

Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA
Engenharia de Energia

**Avaliação Comparativa de Métodos de
Agrupamento para Quantificação de
Harmônicas e Inter-harmônicas**

Autor: Fabricio de Matos Alves
Orientador: Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita

Brasília, DF
2019



Fabricio de Matos Alves

Avaliação Comparativa de Métodos de Agrupamento para Quantificação de Harmônicas e Inter-harmônicas

Monografia submetida ao curso de graduação
em Engenharia de Energia da Universidade
de Brasília, como requisito parcial para ob-
tenção do Título de Bacharel em Engenharia
de Energia.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita

Brasília, DF

2019

Fabricio de Matos Alves

Avaliação Comparativa de Métodos de Agrupamento para Quantificação de Harmônicas e Inter-harmônicas/ Fabricio de Matos Alves. – Brasília, DF, 2019-
116 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB
Faculdade UnB Gama – FGA , 2019.

1. Agrupamento. 2. Harmônicas e Inter-harmônicas. I. Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Avaliação Comparativa de Métodos de Agrupamento para Quantificação de Harmônicas e Inter-harmônicas

CDU 02:141:005.6

Fabricio de Matos Alves

Avaliação Comparativa de Métodos de Agrupamento para Quantificação de Harmônicas e Inter-harmônicas

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 11 dezembro de 2019 – Data da aprovação do trabalho:

Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita
Orientador

Dr. Alex Reis
Convidado 1

**Dr. Flávio Henrique Justiniano
Ribeiro da Silva**
Convidado 2

Brasília, DF
2019

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por proporcionar saúde e dedicação em cada etapa da minha formação.

Em seguida, agradeço à senhora Lucivânia, minha mãe, pelo apoio emocional e a presença constante. Agradeço, também, a minha família pelo apoio financeiro e motivacional durante todo o tempo destinado.

Vale destacar o apoio significativo da minha companheira amorosa, Gizelly, pela paciência e pelo suporte nos momentos complicados, ajudando-me a superá-los.

Além disso, agradeço aos professores pelo incentivo e pelos conhecimentos passados que foram de grande auxílio para a minha formação. Podendo destacar o professor Dr. Jorge Cormane, meu orientador, que me proporcionou realizar este trabalho, além de tantos outros. Como, também, agradeço aos meus colegas de formação e a todos que me ajudaram a cada instante.

O presente estudo foi realizado no âmbito do Edital 04/2017 - Seleção Pública de Propostas de Pesquisa Científica, Tecnológica e Inovação Demanda Espontânea da Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal – FAPDF, com o projeto intitulado “DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA DE COMPRESSÃO BASEADA EM UMA ABORDAGEM DISSOCIATIVA PARA FORMAS DE ONDA DE DISTÚRBIOS PRODUZIDOS EM REDES ELÉTRICAS”. Termo de Outorga 1373/2017 e Número do processo: 193.001.474/2017.

*“Às vezes, são as pessoas de quem menos esperamos que
são capazes de fazer coisas que ninguém poderia esperar.
(O Jogo da Imitação, Alan Turing)*

Resumo

As harmônicas e inter-harmônicas presentes nos sistemas de potências exercem grandes influências na qualidade da energia elétrica (QEE), o que torna fundamental a quantificação das mesmas. Nesse sentido, este trabalho almeja analisar comparativamente os métodos de agrupamento para quantificação propostos pelo IEC 61000-4-7 e o Chang destacado na literatura. A análise é conduzida por uma avaliação da coerência dos resultados desde o ponto de vista da quantificação dos indicadores THD (do inglês, *Total Harmonic Distortion*), TID (do inglês, *Total Interharmonic Distortion*) e da energia para os sinais até a reconstrução desses sinais no domínio do tempo. Os sinais com harmônicas e inter-harmônicas são construídos a partir de algumas referências na literatura e conforme as recomendações da ANEEL. Esses sinais são apresentados como sinais sintéticos de tensão e corrente. É apresentado uma metodologia de teste de sensibilidade à amplitude e frequências que servirá de subsídio para quantificação das discrepâncias entre os valores teóricos e obtidos do THD, TID e energia. Nos resultados do teste de sensibilidade é destacado para o método IEC uma maior sensibilidade no indicadores THD e TID para a presença de inter-harmônicas com amplitude acima de 20% da fundamental e próximas à componente contínua (CC), à fundamental e às harmônicas. E para o método Chang, a sensibilidade no indicador THD é elevada para as frequências entre as harmônicas e próximas à CC com amplitude acima de 20 % da fundamental. Os resultados para a energia do espectro não apresentaram discrepâncias significativas. As técnicas de reconstrução dos sinais são apresentadas também e feitas a partir dos métodos IEC, Chang e duas propostas de algoritmo de ajuste de frequência com a utilização da fase predominante em todos as técnicas. Os algoritmos propostos elevaram os valores de relação sinal-ruído em cerca de 5 a 10 decibéis (dB) em comparação com os métodos IEC e Chang, além da redução do erro absoluto em 10 %.

Palavras-chaves: Agrupamento. Harmônicas e inter-harmônicas. Método IEC 61000-4-7. Método Chang.

Abstract

The harmonics and interharmonics present in the power systems exert great influences on the quality of the electric energy (QEE), which makes their quantification fundamental. In this sense, this work aims to comparatively analyze the grouping methods for quantification proposed by IEC 61000-4-7 and Chang highlighted in the literature. The analysis is conducted by an assessment of the coherence of the results from the point of view of quantifying the Total Harmonic Distortion (THD), Total Interharmonic Distortion (TID) and spectrum energy indicators for signals to the time domain reconstruction of these signals. The signals with harmonics and interharmonics are constructed from some references in the literature and as recommended by ANEEL. These signals are presented as synthetic signals of voltage and current. It is presented a methodology of amplitude and frequency sensitivity test that will serve as a subsidy to quantify the discrepancies between the theoretical and obtained values of THD, TID and the energy density spectrum. In the results of the sensitivity test, the IEC method emphasizes the higher sensitivity in the THD and TID indicators for the presence of interharmonics with amplitude above 20 % of the fundamental and close to the continuous component (CC), the fundamental and the harmonics. And for the Chang method, the sensitivity in the THD indicator is high for the frequencies between harmonics and close to CC with amplitude above 20 % of the fundamental. The results for energy density spectrum showed no significant discrepancies. The Signal reconstruction techniques are also presented and based on the IEC, Chang and two frequency adjustment algorithm proposals using the predominant phase in all techniques. The proposed algorithms raised the signal-to-noise values by 5-10 decibels (dB) compared to the IEC and Chang methods, and reduced the absolute error by 10 %.

Key-words: Grouping. Harmonics and interharmonics. IEC 61000-4-7 method. Chang method.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação de uma onda com distorção harmônica e os harmônicos separados.	22
Figura 2 – Forma de onda do sinal $x_1(t)$ no domínio do tempo.	25
Figura 3 – O sinal $x_1(t)$ no domínio da frequência.	26
Figura 4 – Forma de onda do sinal $x_2(t)$ no domínio do tempo.	27
Figura 5 – Representação do <i>short-range leakage</i> do sinal $x_2(t)$	27
Figura 6 – Forma de onda do sinal $x_3(t)$ no domínio do tempo.	28
Figura 7 – Representação do <i>long-range leakage</i> do sinal $x_3(t)$	29
Figura 8 – Forma de onda do sinal $x_4(t)$ no domínio do tempo.	30
Figura 9 – Espectro de frequência da aplicação da DTFT e DFT ao sinal $x_4(t)$	30
Figura 10 – Representação gráfica dos grupos e subgrupos harmônicos.	37
Figura 11 – Representação gráfica dos grupos e subgrupos inter-harmônicos.	37
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de agrupamento IEC 61000-4-7.	39
Figura 13 – Diagramas fasoriais das harmônicas: (a) componente fundamental (sequência positiva); (b) segunda harmônica (sequência negativa); (c) terceira harmônica (sequência zero).	40
Figura 14 – Diagramas fasoriais das harmônicas e inter-harmônicas de correntes de carga.	40
Figura 15 – Bandas de frequências de sequência dominante para 60 Hz.	41
Figura 16 – Bandas de frequências de sequência dominante aplicada no espectro.	42
Figura 17 – Amplitudes e frequências equivalentes das FG.	43
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo de agrupamento Chang.	44
Figura 19 – Representação gráfica da variação da amplitude da componente inter-harmônica.	46
Figura 20 – Representação gráfica da variação da frequência da componente inter-harmônica com intervalo de 5 Hz.	47
Figura 21 – Representação gráfica da variação da frequência da componente inter-harmônica com intervalo de 3 Hz.	48
Figura 22 – Fluxograma do teste de sensibilidade à amplitude e frequência.	48
Figura 23 – Espectro de amplitude resultante do agrupamento pelo método IEC 61000-4-7.	50
Figura 24 – Espectro de fase das frequências resultantes do agrupamento.	50
Figura 25 – Espectro com <i>long range leakage</i> e a identificação das componentes máximas para o 1º algoritmo.	52
Figura 26 – Espectro com <i>short range leakage</i> e a identificação das componentes máximas para o 2º algoritmo.	53

Figura 27 – Fluxograma do 1º algoritmo proposto de ajuste da frequência de agrupamento.	54
Figura 28 – Fluxograma do 2º algoritmo proposto de ajuste da frequência de agrupamento.	55
Figura 29 – Valor do THD original ao longo do teste de sensibilidade.	62
Figura 30 – Resultados dos THD do método IEC - Subgrupo harmônico ao longo do teste de sensibilidade.	63
Figura 31 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo harmônico (Fig. 30) e o valor do THD original (Fig. 29).	64
Figura 32 – Resultados dos THD do método Chang ao longo do teste de sensibilidade.	64
Figura 33 – Discrepâncias entre os resultados do Chang (Fig. 32) e o valor do THD original (Fig. 29).	65
Figura 34 – Valores dos TID original ao longo do teste de sensibilidade.	66
Figura 35 – Resultados dos TID do método IEC - Subgrupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.	66
Figura 36 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo inter-harmônico (Fig. 35) e os valores dos TID originais (Fig. 34).	67
Figura 37 – Valores das energias dos espectros originais ao longo do teste de sensibilidade.	68
Figura 38 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Subgrupo harmônico / inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.	68
Figura 39 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo harmônico / inter-harmônico (Fig. 38) e o valores das energias originais (Fig. 37).	69
Figura 40 – Resultados das energias dos espectros do método Chang ao longo do teste de sensibilidade.	70
Figura 41 – Discrepâncias entre os resultados do método Chang (Fig. 40) e o valores das energias originais (Fig. 37).	70
Figura 42 – Resultados do sinal de tensão com método IEC com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	72
Figura 43 – Resultados do sinal de corrente com método IEC fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	72
Figura 44 – Resultados do sinal de tensão com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	73
Figura 45 – Resultados do sinal de corrente com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	74
Figura 46 – Resultados do sinal de tensão com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	75

Figura 47 – Resultados do sinal de corrente com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	75
Figura 48 – Resultados do sinal de tensão com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	76
Figura 49 – Resultados do sinal de corrente com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	77
Figura 50 – Resultados dos THD do método IEC - Grupo harmônico ao longo do teste de sensibilidade	84
Figura 51 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo harmônico (Fig. 50) e o valor do THD original (Fig. 29).	85
Figura 52 – Resultados dos TID do método IEC - Grupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.	85
Figura 53 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo inter-harmônico (Fig. 52) e os valores dos TID originais (Fig. 34).	86
Figura 54 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Grupo harmônico / Subgrupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade . . .	86
Figura 55 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo harmônico / Subgrupo inter-harmônico (Fig. 54) e o valores das energias originais (Fig. 37).	87
Figura 56 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Subgrupo harmônico / Grupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.	87
Figura 57 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo harmônico / Grupo inter-harmônico (Fig. 56) e o valores das energias originais (Fig. 37).	88
Figura 58 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Grupo harmônico / inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.	88
Figura 59 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo harmônico / inter-harmônico (Fig. 58) e o valores das energias originais (Fig. 37).	89
Figura 60 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônica com método IEC com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	90
Figura 61 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônica com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	91
Figura 62 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônico com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	91
Figura 63 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônicas com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	92

Figura 64 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com método IEC com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	93
Figura 65 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).	93
Figura 66 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E). .	94
Figura 67 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E). .	94

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores de frequência e amplitude de tensão por unidade (pu) com harmônicas.	58
Tabela 2 – Valores de frequência e amplitude de tensão em pu com harmônicas e inter-harmônicas.	58
Tabela 3 – Valores de frequência e amplitude de corrente em pu com harmônicas.	59
Tabela 4 – Valores de frequência e amplitude de corrente em pu com harmônicas e inter-harmônicas.	59
Tabela 5 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de tensão com harmônicas.	60
Tabela 6 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de corrente com harmônicas.	60
Tabela 7 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de tensão com harmônicas e inter-harmônicas.	60
Tabela 8 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de corrente com harmônicas e inter-harmônicas.	61
Tabela 9 – Valores de frequência e amplitude por unidade (pu) com harmônicas do sinal de teste.	61
Tabela 10 – Desempenho das reconstruções em SNR para os métodos avaliados.	77
Tabela 11 – Resultados das energias calculadas no domínio do tempo dos sinais reconstruídos com os métodos avaliados.	78
Tabela 12 – Desempenho da reconstrução do sinal de corrente (Tab. 4) em SNR para os métodos avaliados.	92
Tabela 13 – Resultados das energias calculadas no domínio do tempo dos sinal de corrente (Tab. 4) reconstruído com os métodos avaliados.	92
Tabela 14 – Desempenho da reconstrução do sinal de corrente não estacionário em SNR para os métodos avaliados.	95
Tabela 15 – Resultados das energias calculadas no domínio do tempo dos sinal de corrente não estacionário, reconstruído com os métodos avaliados.	95

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Componente Contínua
CTFT	<i>Continuos Time Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier em Tempo Contínuo
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> - Transformada Discreta de Fourier
DTFT	<i>Discrete-Time Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier em Tempo Discreto
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> - Transformada Rápida de Fourier
FG	Frequência de Grupo
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i> - Raiz do valor quadrático médio
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i> - Relação sinal-ruído
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> - Distorção Harmônica Total
TID	<i>Total Interharmonic Distortion</i> - Distorção Inter-harmônica Total

Lista de símbolos

f_o	Frequência fundamental
ω	Frequência angular
f_S	Frequência de amostragem
f_{ih}	Frequência inter-harmônica
f_{n_h}	Frequência harmônica
Δf	Resolução em frequência
t	Tempo
$x(t)$	Sinal genérico
$\hat{x}(t)$	Sinal reconstruído
T_S	Período de amostragem
T_w	Período da janela
N_w	Número de amostras da janela
N	Vetor comprimento da janela
n_h	Ordem harmônica
A	Amplitude
ϕ_h	Fase harmônica
ϕ_{ih}	Fase inter-harmônica
$\epsilon(t)$	Ruído gaussiano branco de média zero
C_k	Componente de frequência k
$C_k^{máx}$	Componente máxima de frequência k
$G_{g,n}$	n -ésimo grupo harmônico
$G_{sg,n}$	n -ésimo subgrupo harmônico
$G_{ig,n}$	n -ésimo grupo inter-harmônico

$G_{isg,n}$	n -ésimo subgrupo inter-harmônico
$f_{ihg,n}$	Frequência do n -ésimo grupo inter-harmônico
$f_{ihsg,n}$	Frequência do n -ésimo subgrupo inter-harmônico
f_1	Limite mínimo da banda de frequência
f_2	Limite máximo de banda de frequência
$X_{G(f_1,f_2)}$	Amplitude de grupo
$f_{G(f_1,f_2)}$	Frequência de grupo
K_Ω	Índice de qualidade de energia específico
E	Erro absoluto

Sumário

1	INTRUDUÇÃO	19
1.1	Objetivos	20
1.2	Organização do trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Harmônicas e inter-harmônicas	21
2.2	Medições	22
2.2.1	Aplicação da DFT e a análise espectral	22
2.2.2	Vazamento espectral	25
2.2.3	Conceito de agrupamento em frequência	31
2.3	Estado da Arte	32
3	METODOLOGIA	35
3.1	Materiais	35
3.1.1	Método padrão IEC 61000-4-7	35
3.1.1.1	Aplicação de grupos e subgrupos	36
3.1.1.2	Algoritmo de agrupamento IEC 61000-4-7	38
3.1.2	Método Chang	39
3.1.2.1	Aplicação da frequência de grupo	42
3.1.2.2	Algoritmo de agrupamento Chang	43
3.1.3	Indicadores de distorção e energia do espectro	44
3.1.4	Teste de sensibilidade à amplitude e frequência	46
3.2	Métodos	49
3.2.1	Reconstrução dos sinais após agrupamento IEC 61000-4-7 e o método Chang com as fases predominantes	49
3.2.2	Reconstrução dos sinais após os algoritmos propostos de ajuste na frequência do agrupamento IEC 61000-4-7	51
3.2.2.1	Proposta do 1º algoritmo	54
3.2.2.2	Proposta do 2º algoritmo	55
3.2.3	Métricas de desempenho qualitativo da reconstrução	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Sinais sintéticos	57
4.2	Aplicação dos métodos IEC e Chang em sinais sintéticos de tensão e corrente	60
4.2.1	Sinal de tensão e corrente com harmônicas	60

4.2.2	Sinal de tensão e corrente com harmônicas e inter-harmônicas	60
4.3	Avaliação do teste de sensibilidade à amplitude e frequência dos métodos IEC e Chang	61
4.3.1	Resultados para o THD	62
4.3.2	Resultados para o TID	65
4.3.3	Resultados para a Energia do Espectro	67
4.4	Avaliação dos resultados da reconstrução dos sinais sintéticos	71
4.4.1	Reconstrução proposta com o agrupamento IEC e o Chang com as fases predominantes	71
4.4.2	Reconstrução com o 1º algoritmo proposto	74
4.4.3	Reconstrução com o 2º algoritmo proposto	76
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Trabalhos futuros	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A – DEMAIS RESULTADOS DO TESTE DE SENSIBILIDADE	84
A.1	THD	84
A.2	TID	85
A.3	Energia do Espectro	86
	APÊNDICE B – RESULTADOS DA RECONSTRUÇÃO PARA OUTROS SINAIS	90
B.1	Sinal de corrente com inter-harmônicas (Tab. 4)	90
B.2	Sinal de corrente não estacionário com harmônicas e inter-harmônicas	93
	APÊNDICE C – CÓDIGOS DA SIMULAÇÃO REALIZADOS EM SOFTWARE MATLAB®	96
C.1	Código da construção do sinal de sintético	96
C.2	Código do método IEC	97
C.3	Código do método Chang	102
C.4	Código da simulação dos métodos para o sinal de tensão	104
C.5	Código da simulação dos métodos para o sinal de corrente	104
C.6	Código da simulação dos métodos para o sinal de tensão com inter-harmônicas	105

C.7	Código da simulação dos métodos para o sinal de corrente com inter-harmônicas	106
C.8	Código da simulação do teste de sensibilidade à amplitude e frequência	107
C.9	Código do 1º algoritmo proposto	110
C.10	Código do 2º algoritmo proposto	112

1 Introdução

As componentes harmônicas e inter-harmônicas estão presentes no dia a dia de um sistema de potência e tendo em vista a importância de quantificar essas componentes, por exemplo, para medir distorções harmônicas e inter-harmônicas nos sinais de tensão e corrente, sendo esta, uma atividade de estudo relevante no campo da qualidade da energia elétrica (QEE).

Dentre os procedimentos para quantificar, é de destaque, no contexto internacional, o padrão IEC 61000-4-7 (IEC) que utiliza o conceito de agrupamento das componentes harmônicas e inter-harmônicas a partir de grupos e subgrupos (IEC, 2002), e a norma ABNT NBR IEC 61000-4-30 (ABNT, 2011) que define a configuração de agrupamento. Além disso, uma proposta de quantificar é abordada na literatura e acrescentada neste trabalho, trata-se do modelo de agrupamento proposto por Chang et al. (2004).

A problemática deste trabalho está inserida nos resultados discrepantes obtidos por simulações dos métodos abordados anteriormente para sinais semelhantes aos sinais de tensão e corrente. Os parâmetros para os resultados são os indicadores de distorção harmônica total (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*), distorção inter-harmônica total (TID, do inglês *Total Interharmonic Distortion*) e a energia total nos espectros obtidos. A partir da problemática encontrada, este trabalho propõe uma metodologia de teste de sensibilidade à amplitude e frequência para submeter os métodos as diferentes condições e avaliar os seus comportamentos acerca dos parâmetros. Os resultados do teste ampliam a visão comparativa dos métodos e acrescenta em uma avaliação detalhada. Além disso, uma parte do trabalho foi destinada às formas e propostas de reconstrução de sinais no domínio do tempo a partir da aplicação dos métodos IEC e Chang, que por sua vez, foi essencial para avaliação dos métodos e para a elaboração de propostas de reconstrução que fossem eficazes.

O motivo para o qual realizar esta avaliação está em identificar formas de sanar as discrepâncias presentes nos métodos de agrupamento IEC e Chang, o que leva a futuras propostas de aprimoramentos ou um novo método de agrupamento. Vale destacar que esses métodos podem substituir os métodos usuais (IEC) nos medidores de para aprimorar as medições, respeitando os protocolos nacionais, tal como o principal, o Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) (ANEEL, 2017), que determinam os limites percentuais para as distorções dos níveis de tensão. Sendo assim, é possível estabelecer uma relação de confiança entre os clientes e as concessionárias de energia elétrica.

1.1 Objetivos

Neste trabalho, o objetivo geral é analisar comparativamente os métodos de agrupamento propostos pelo IEC 61000-4-7 e o Chang, avaliando a coerência dos seus resultados desde o ponto de vista da quantificação do THD, TID e da energia.

Especificamente, para alcançar o objetivo geral são traçados alguns objetivos específicos:

- Avaliar comparativamente os resultados da aplicação métodos IEC 61000-4-7 e Chang para agrupamento das componentes de frequências harmônicas e inter-harmônicas.
- Testar a sensibilidade dos indicadores para quantificação da distorção harmônica e inter-harmônica quando há variação da amplitude e da frequência.
- Desenvolver estratégias de reconstrução dos sinais no domínio do tempo após a aplicação dos métodos de agrupamento IEC 61000-4-7 e Chang.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho é constituído por 5 capítulos. O capítulo 1 remete a introdução, onde estão abordadas as contextualizações do tema com uma breve abordagem da problemática e a motivação de realizar este trabalho, frisando com a justificativa prévia. É também apresentado o objetivo geral seguido dos objetivos específicos para alcançá-lo.

O capítulo 2 aborda os conceitos e as definições teóricas do trabalho, além das formulações matemáticas associadas ao trabalho. Uma pesquisa de referências bibliográficas e os trabalhos existentes no ramo em questão, dito como estado da arte, também é abordado nesse capítulo.

O capítulo 3 trata da metodologia aplicada neste trabalho, os materiais, as ferramentas e os métodos propostos e utilizados.

O capítulo 4 traz os resultados para os cálculos individuais dos sinais construídos, as reconstruções realizadas com os estratégias propostas e os testes de sensibilidade obtidos pelas simulações, além do mais, os resultados são interpretados e discutidos.

O capítulo 5 apresenta as conclusões tiradas deste trabalho, as contribuições atreladas aos testes e as propostas de trabalhos futuros dando sequência ao tema do trabalho.

2 Referencial Teórico

Neste capítulo, as definições e os conceitos teóricos que caracterizam este trabalho são apresentados, assim como uma descrição prévia dos trabalhos desenvolvidos na literatura acerca do tema de agrupamento de harmônicas e inter-harmônicas.

2.1 Harmônicas e inter-harmônicas

As frequências harmônicas são definidas como múltiplas inteiras da frequência fundamental e as frequências inter-harmônicas são múltiplas não inteiras da frequência fundamental, para fins práticos, as inter-harmônicas estão espacialmente localizadas entre duas frequências harmônicas vizinhas. Além disso, existe o termo sub-harmônica que nada mais é do que um caso particular de inter-harmônica para frequências menores que a frequência fundamental (IEC, 2002)(HANZELKA; BIEN, 2004). Essas frequências possuem ordens que são caracterizadas pelos efeitos nos sinais reais, como sinais de tensão e corrente. De acordo com Hanzelka e Bien (2004), a ordem de uma frequência harmônica é o número inteiro obtido pela razão entre a frequência harmônica e a frequência fundamental, de forma análoga, a ordem de uma frequência inter-harmônica é razão entre a frequência inter-harmônica e a frequência fundamental, não necessariamente um número inteiro.

No âmbito real, as harmônicas causam deformações periódicas ao longo da forma de onda, especificamente, das tensões e correntes senoidais que possuem uma frequência fundamental (ANEEL, 2017). As distorções harmônicas são causadas por dispositivos não lineares conectados aos sistemas de potências, os dispositivos não lineares não apresentam uma proporcionalidade entre tensão aplicada e corrente de saída, ou seja, ao aplicar uma tensão senoidal a corrente resultante é distorcida em relação à senoide (DUGAN et al., 2003). A Figura 1 mostra um sinal distorcido com harmônicas que pode ser decomposto em uma soma das harmônicas por meio de técnicas de Fourier.

As inter-harmônicas também causam distorções nas formas de onda com características de não periódicas. Nesse sentido, há duas fontes básicas de geração de inter-harmônicos, a primeira se refere aos componentes que estão próximos à frequência fundamental da tensão que os alimentam e seus harmônicos devido aos resultados de variações nas intensidades e fase causadas por rápidas mudanças de corrente nos equipamentos e nas cargas. Em casos de cargas que operam em regime transitório, seja ele, contínuo ou temporário, como em fornos de arco e ciclo-conversores, são geradas essas rápidas mudanças, ou seja, as perturbações. A outra fonte está relacionada ao chaveamento assíncrono, não está sincronizado com a frequência fundamental, nos dispositivos conversores de frequência e conversores PWM (*Pulse Width Modulation*). As inter-harmônicas podem ser geradas em

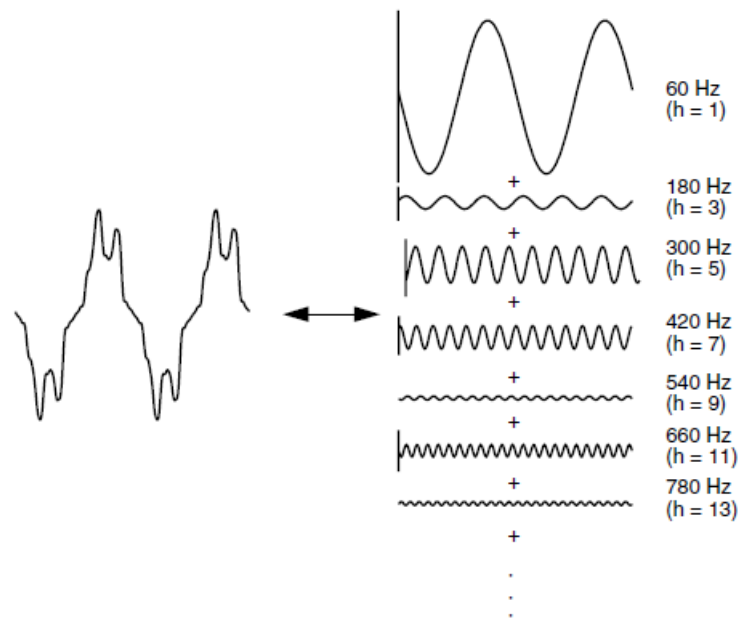


Figura 1 – Representação de uma onda com distorção harmônica e os harmônicos separados. Fonte: (DUGAN et al., 2003)

toda uma faixa de frequências em relação as tensões harmônicas da alimentação (DUGAN et al., 2003)(HANZELKA; BIEN, 2004).

2.2 Medições

As medições de harmônicas e inter-harmônicas refletem uma série de dificuldades para obter resultados precisos. Devidos aos problemas de sincronização entre frequências, os instrumentos de medições utilizam uma malha de captura de fase (PLL, do inglês *Phase-Locked Loop*), para sincronizar as medições com a frequência fundamental e constrói ciclos com amostras do sinal de forma a analisar com a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). As amostras com um único ciclo apresentam um espectro preciso para somente frequências harmônica, a presença de inter-harmônicas ou formas de onda amostradas de modo não periódico para o mesmo intervalo de tempo dificultam interpretação do espectro (HANZELKA; BIEN, 2004).

2.2.1 Aplicação da DFT e a análise espectral

A transformada de Fourier é uma ferramenta fundamental para análise de espectro de harmônicas e inter-harmônicas, isto é, a avaliação da energia do sinal no domínio da frequência. A definição da transformada direta para sinais contínuos no tempo $x(t)$ é dita como Transformada de Fourier em Tempo Contínuo (CTFT, do inglês *Continuous Time*

Fourier Transform) e o equacionamento é dado por

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.1)$$

onde ω é a frequência angular dada em radianos por segundo e $F(j\omega)$ é a amplitude complexa. Conforme as propriedades da transformada direta, o processo inverso é obtido pela Transformada Inversa de Fourier dado por

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.2)$$

Conforme exposto, as transformadas apresentadas são para sinais de caráter contínuo, modelando as transformadas para um domínio discreto, sendo o tempo é amostrado com intervalo de T_s , chamado de período de amostragem. O que resulta em um sinal amostrado $x[n]$ que representa o sinal $x(t)$ para instantes de $t = nT_s$. Ou seja, o sinal amostrado é $x[n] = x(nT_s)$, onde as amostras são separadas entre si por n/f_s e f_s é a frequência de amostragem (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010). Deste modo, a análise de espectro para sinais discretos é dada pela Transformada de Fourier em Tempo Discreto (DTFT, do inglês *Discrete-Time Fourier Transform*), mostrada a seguir.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (2.3)$$

Onde $x[n]$ é o sinal discreto com número de amostras infinitas e $X(e^{j\omega})$ é o espectro contínuo e periódico (com período 2π) de frequência. De forma análoga, a DTFT possui transformada inversa, para título de informação, é dada por

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega. \quad (2.4)$$

O intervalo de integração é dado de $-\pi$ a $+\pi$, pois a transformada é periódica de período 2π . No contexto de aplicação da transformada em sinais reais de tensão ou corrente, os sinais são discretos e finitos, ou seja, define-se então uma amostragem da DTFT, com amostras uniformemente separadas entre 0 e 2π (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010), é chamada de Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*). A expressão é dada por

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N_w-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi nk}{N_w}}, \quad 0 \leq k \leq (N_w - 1) \quad (2.5)$$

sendo N_w o número de amostras em um período definido, ou seja, uma janela. A relação entre a DTFT e DFT pode ser expressa ao considerar $\omega = 2\pi k/N_w$.

Há uma operação que é realizada na Eq. 2.5, além da amostragem para obter o $X[k]$, trata-se de um janelamento ou truncamento que resulta no valor de N_w amostras. Portanto a Eq. 2.5 é reformulada para

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N_w-1} w[n]x[n]e^{-j\frac{2\pi nk}{N_w}}, \quad 0 \leq k \leq (N_w - 1) \quad (2.6)$$

onde $w[n]$ é uma função janela que multiplica o sinal $x[n]$, para o caso da Eq. 2.6 o $w[n]$ é dita janela retangular onde a expressão é dada por

$$w[n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq (N_w - 1) \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (2.7)$$

A implementação da DFT é feita para um intervalo de tempo limitado, ou seja, uma janela de período de T_w (segundos) com um número N de amostras por janela do sinal real. Os resultados da DFT variam com os valores de T_w e N_w , de fato, a escolha do tamanho da janela no domínio do tempo, que está associada a resolução no domínio da frequência, e a quantidade de amostras por janelas são fundamentais para análise do espectro (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010).

Em termos de complexidade computacional, ao observar a Eq.2.5, nota-se que DFT requer N_w multiplicações complexas e $N_w - 1$ adições complexas. Desta forma, para o cálculo completo de uma sequência haverá cerca de N_w^2 multiplicações complexas e $(N_w - 1)N_w$ adições complexas. Considerando valores altos de N_w o número de multiplicações e adições tendem à N_w^2 . A fim de reduzir esse número para utilizar menos complexidade computacional, é apresentado o algoritmo conhecido como *Fast Fourier Transform* (FFT) (COOLEY; TUKEY, 1965).

O algoritmo da FFT realiza uma divisão recursiva da DFT em sequências pares e ímpares até formarem grupos com duas amostras cada. Com isso, o número de multiplicações e adições complexas são reduzidos para $N_w \log_2(N_w)$ e, conseqüentemente, é reduzida a complexidade computacional de execução. Por outro lado, o algoritmo limita que N_w seja equivalente à potência de 2 (COOLEY; TUKEY, 1965).

A aplicação da FFT em sinais periódicos cuja a frequência fundamental e suas harmônicas são múltiplas inteiras da resolução de frequência significa que a amostragem é síncrona, ou seja, a energia no domínio da frequência será concentrada somente em frequências que correspondem às componentes do sinal. Por outro lado, se a amostragem for assíncrona ou houver frequências inter-harmônicas que, conseqüentemente, não são múltiplas inteiras da frequência fundamental e variam no decorrer do tempo causando distorções não-periódicas). Torna-se mais difícil a análise do espectro, pois a energia é distribuída para outras amostras (frequências) que, teoricamente, não fazem parte do sinal por não existirem. Esse fenômeno é dito vazamento espectral (Seção 2.2.2). Além disso, as componentes originais do sinal são afetadas, tanto em frequência quanto em amplitude, devido ao fenômeno (MONTEIRO, 2014).

Na presença de inter-harmônicas, a influência do vazamento espectral possui intensidades diferentes de acordo com a posição das mesmas em relação as harmônicas do sinal, para inter-harmônicas distantes dos componentes harmônicos a influência do vazamento espectral é menor e para inter-harmônicas mais próximas a influência é maior.

O que ocorre é que no vazamento espectral quanto mais próxima da componente inter-harmônica os valores de amplitude são mais significativos e possuem maior influência, essas amplitudes são reduzidas abruptamente quando afastadas da componente inter-harmônica (MONTEIRO, 2014).

2.2.2 Vazamento espectral

O fenômeno de vazamento espectral é quando uma componente do sinal, no domínio da frequência, tem sua energia “espalhada” para outras amostras próximas à mesma. O fenômeno ocorre quando, há presente no sinal, componentes que possuem frequências que não são múltiplas da resolução e quando a amostragem é assíncrona (MONTEIRO, 2014). Além disso, a presença de sinais não estacionários, onde as frequências se alteram ao longo do tempo, são capazes de gerar vazamentos espectrais para a utilização de janelas fixas (MACEDO, 2009).

Antes de caracterizar o vazamento espectral, é tomado um sinal sintético para demonstrar a determinação da resolução na frequência e a amostragem sincronizada. O sinal indicado pela Eq. 2.8 é composto pela frequência fundamental de 60 Hz e uma segunda harmônica (120 Hz) com 40% da amplitude da fundamental. O sinal de exemplo representa 12 ciclos de 60 Hz, ou seja, com uma janela de $\Delta t = 12/60 = 0,2$ segundos de duração.

$$x_1(t) = 1,0 \sin(2\pi 60t) + 0,4 \sin(2\pi 120t), \quad 0 \leq t \leq 0,2 \text{ seg} \quad (2.8)$$

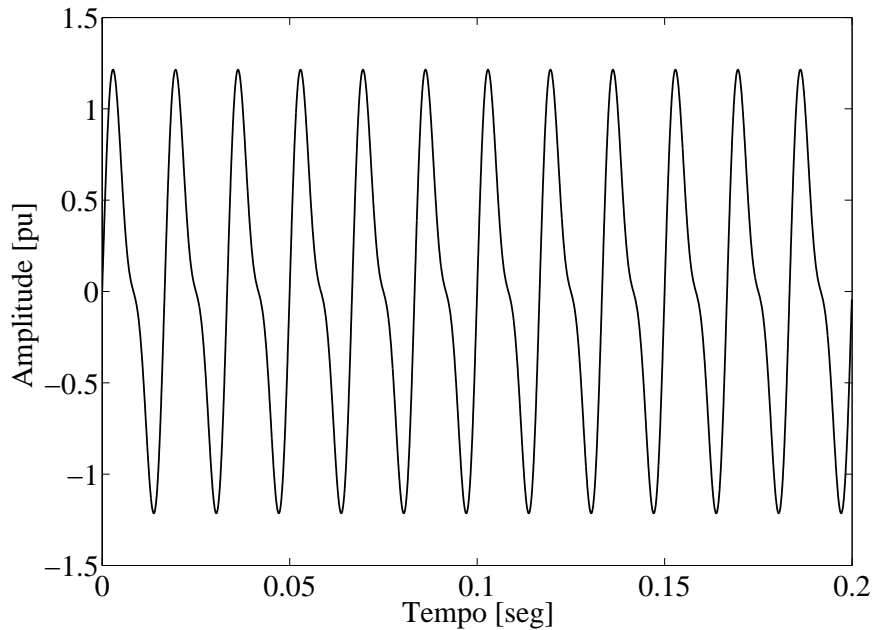


Figura 2 – Forma de onda do sinal $x_1(t)$ no domínio do tempo.

Para o sinal avaliado (Fig. 2), será considerado uma taxa de 256 amostras por cada ciclo de 60 Hz, portanto, a frequência de amostragem f_s é 15360 Hz ($256 \cdot 60$). Além

disso, o sinal é de 12 ciclos o que significa que o comprimento da janela N_w é de 3072 amostras ($15360 \cdot 0,2$). Deste modo, a resolução da frequência desse sinal é dado por

$$\Delta f = \frac{f_s}{N_w} = \frac{15360}{3072} = 5 \text{ Hz} \quad (2.9)$$

onde Δf é a resolução da frequência.

Ao aplicar a DTFT e DFT no sinal da Fig. 2 é possível observar o resultado na Fig. 3, onde a DTFT é uma representação contínua com as ondulações ou lóbulos, e a DFT são amostras, representadas pelas hastes, posicionadas nas frequências múltiplas da resolução.

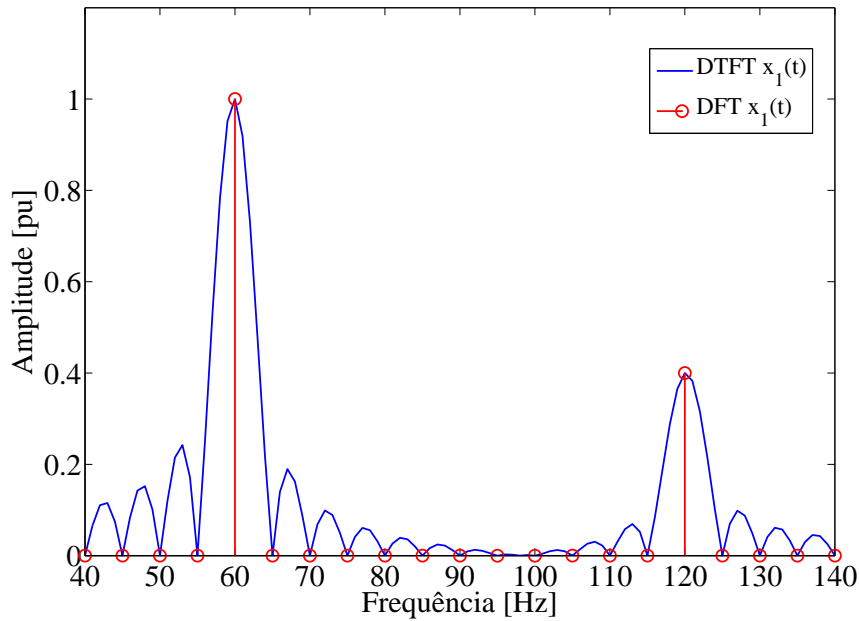


Figura 3 – O sinal $x_1(t)$ no domínio da frequência.

Nota-se que os lóbulos da DTFT são resultados da convolução na frequência da sequência periódica do sinal com a janela retangular (Eq. 2.7). Os lóbulos são caracterizados por uma função *sinc* (MONTEIRO, 2014). Dado que o sinal $x_1(t)$ só possui frequências múltiplas da resolução, a DFT não possuirá vazamento espectral, conforme mostrado na Fig. 3, são representadas apenas as componentes que existem no sinal. Nesse caso, a amostragem (DFT) está sincronizada com a DTFT e, portanto, a representação é fidedigna.

O vazamento espectral é caracterizado conforme a influência que é exercida nas demais componentes próximas à mesma. A presença de inter-harmônicas ou sub-harmônicas e a posição no espectro determinam duas formas de vazamento, *short-range leakage* e *long-range leakage* (LIU; HIMMEL; BONFIG, 2005). O *short-range leakage* ou vazamento de curto alcance, é atribuído a presença de inter-harmônica ou sub-harmônica que está distante de alguma componente harmônica ou da fundamental. Neste caso, a influência do

vazamento espectral é mínima e, portanto, desprezada. Para ilustrar esse tipo de vazamento, um sinal é criado com mesmo f_s e mesma resolução que o sinal $x_1(t)$, contendo uma inter-harmônica em 92,5 Hz, isto é, entre a fundamental (60 Hz) e a segunda harmônica (120 Hz), conforme é mostrado na Eq. 2.10 e pela Fig. 4.

$$x_2(t) = 1,0 \sin(2\pi 60t) + 0,2 \sin(2\pi 92,5t) + 0,4 \sin(2\pi 120t), \quad 0 \leq t \leq 0,2 \text{ seg} \quad (2.10)$$

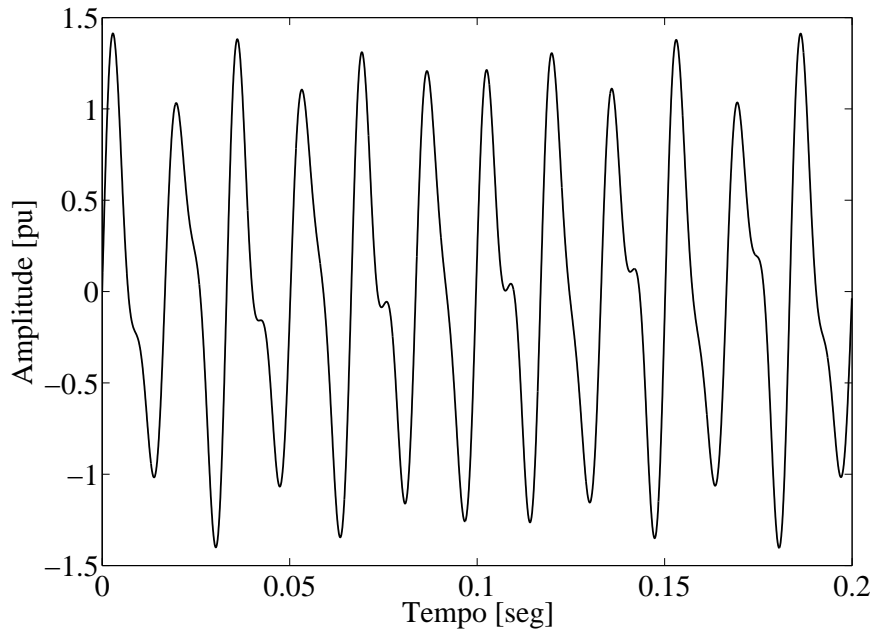


Figura 4 – Form de onda do sinal $x_2(t)$ no domínio do tempo.

O resultado da aplicação da DTFT e da DFT no sinal $x_2(t)$ é mostrado na Fig. 5.

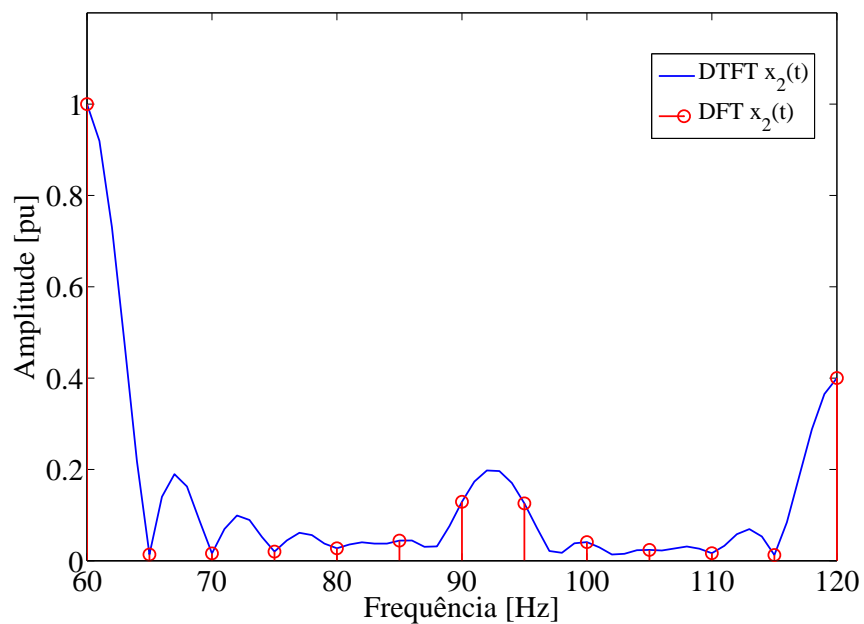


Figura 5 – Representação do *short-range leakage* do sinal $x_2(t)$.

Nota-se pela Fig. 5, que o lóbulo está contido em torno de 92,5 Hz, mas essa frequência não é representada de forma exata pela DFT, pois o valor não é múltiplo inteiro da resolução. Em torno de 90 e 95 Hz compreende os valores da DFT mais representativas da inter-harmônica.

Nas frequências próximas à fundamental e à segunda harmônica o vazamento espectral pode ser negligenciado, pois há uma energia mínima que se espalha nessa região e que não gera mudanças significativas nas amplitudes da fundamental e da segunda harmônica.

O *long-range leakage* ou vazamento de longo alcance, é quando uma componente sub-harmônica ou inter-harmônica se situa próximo à fundamental ou às harmônicas. Para ilustrar, será considerando o sinal $x_3(t)$ que terá os mesmos f_S e resolução na frequência que os demais sinais, descrito pela Eq. 2.11 e pela Fig. 6, onde há uma componente inter-harmônica localizada na frequência 61,5 Hz com cerca de 60 % da amplitude da componente fundamental (60 Hz).

$$x_3(t) = 1,0 \sin(2\pi 60t) + 0,6 \sin(2\pi 61,5t), \quad 0 \leq t \leq 0,2 \text{ seg} \quad (2.11)$$

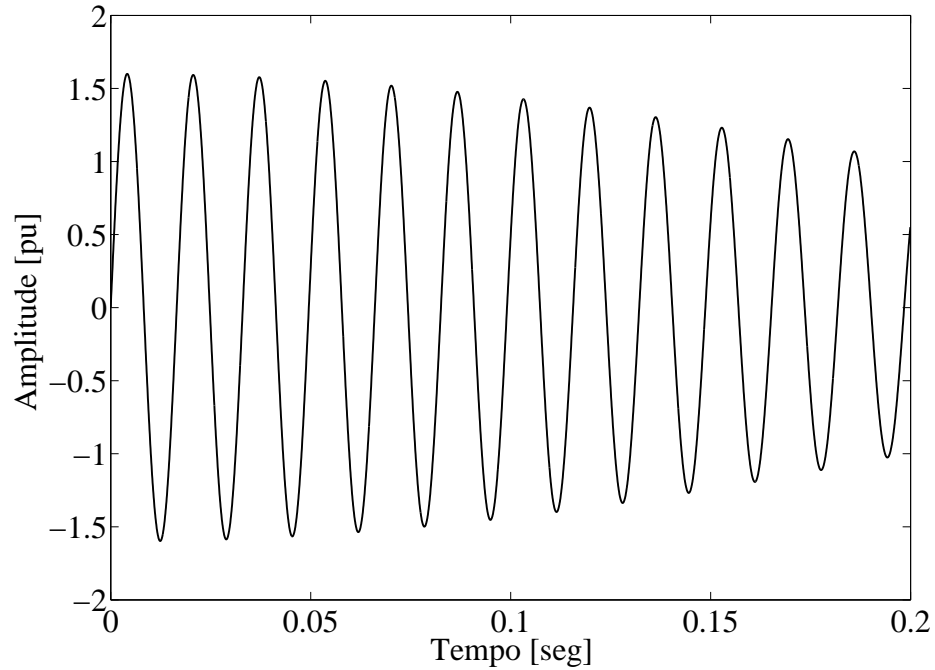


Figura 6 – Forma de onda do sinal $x_3(t)$ no domínio do tempo.

Com o objetivo de mostrar a influência do fenômeno *long-range leakage*, é escolhido uma inter-harmônica tão próxima da fundamental e com uma amplitude elevada.

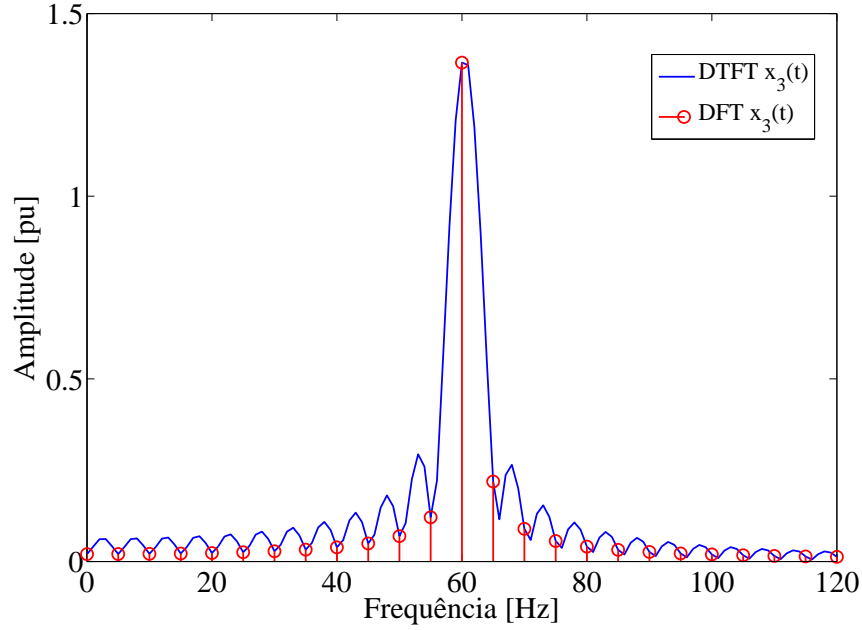


Figura 7 – Representação do *long-range leakage* do sinal $x_3(t)$.

O espectro da DFTF e da DFT do sinal $x_3(t)$ é apresentado na Fig. 7, em que a energia espalhada cobre uma faixa maior de amostras e, como consequência, a amplitude da fundamental é modificada por estar próxima, isto é, uma parcela da energia provida do vazamento espectral da inter-harmônica é agregada à fundamental. Isso é nítido quando se observa a amplitude da amostra em 60 Hz.

Além das inter-harmônicas, o vazamento espectral pode ser causado por amostragem assíncrona que é quando o valor da frequência fundamental assumida é diferente da frequência do sistema. Em caso de sinais não estacionários, a aplicação da DFT com janela fixa provoca vazamento de energia pelo espectro e resultando na adição de frequências espúrias. Para exemplificar, é proposto um sinal $x_4(t)$ (Eq. 2.12) e ilustrado na Fig. 8 com as mesmas condições de f_s e Δf dos sinais anteriores.

$$x_4(t) = \begin{cases} 1,0 \sin(2\pi 60t) + 0,6 \sin(2\pi 90t), & 0 \leq t \leq 0,1 \text{ seg} \\ 1,0 \sin(2\pi 60t) + 0,6 \sin(2\pi 130t), & 0,1 < t \leq 0,2 \text{ seg} \end{cases} \quad (2.12)$$

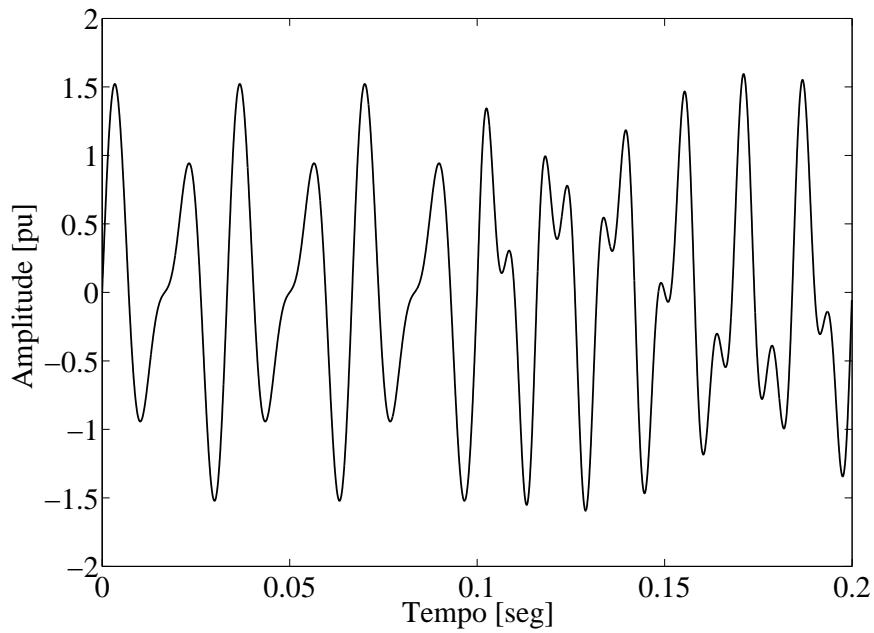


Figura 8 – Forma de onda do sinal $x_4(t)$ no domínio do tempo.

O sinal $x_4(t)$ é composto por uma componente inter-harmônica de 90Hz que varia para 130 Hz na metade da duração do sinal (0,1 segundo). Para análise do fenômeno, o espectro em magnitude de Fourier é obtido para o sinal $x_4(t)$ conforme a Fig. 9.

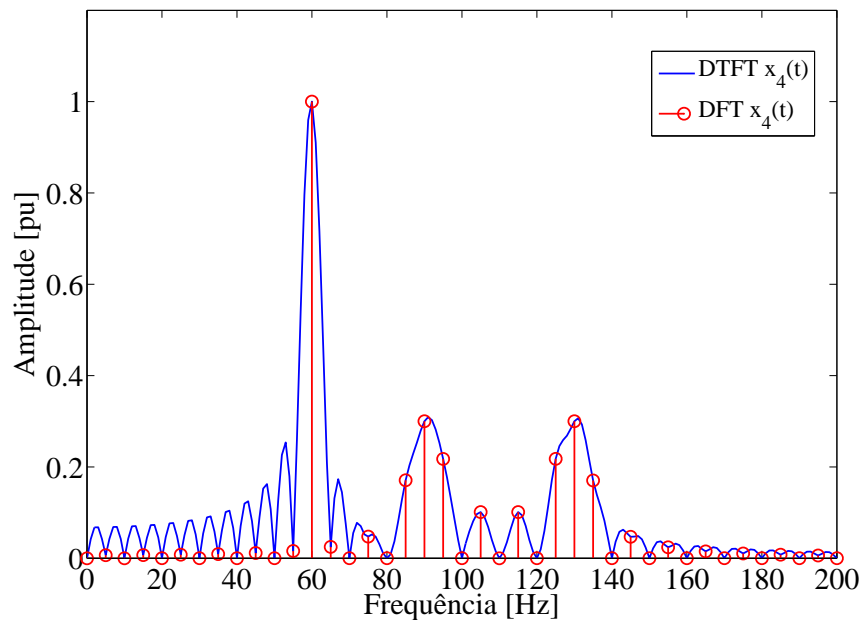


Figura 9 – Espectro de frequência da aplicação da DTFT e DFT ao sinal $x_4(t)$.

O sinal em questão possui um vazamento espectral situado nas frequências 90 e 130 Hz, em que há um perfil quase simétrico em relação à frequência média das inter-harmônicas (valor de 110 Hz). Conforme a Fig. 9, nota-se que os valores das frequências sendo múltiplos inteiros da resolução (5 Hz) não garantem que não haverá presença de energias espúrias para frequências inexistentes no sinal original. De fato, a DFT com

janela fixa não é capaz de acompanhar mudanças de frequências ao longo do tempo, sendo necessário a utilização de mais janelas com diferentes durações.

O controle de amplitude de lóbulos na aplicação da DTFT advém da aplicação de janelas de diferentes configurações. A norma IEC 61000-4-7 relata sobre a utilização da janela do tipo *Hanning* quando há perda de sincronização (IEC, 2002). Nesse sentido, a aplicação da janela *Hanning* reduz o efeito do vazamento espectral em comparação com a janela retangular, conforme mostrado no trabalho realizado por Testa, Gallo e Langella (2004).

2.2.3 Conceito de agrupamento em frequência

Conforme já abordado, a medição de harmônicas junto às inter-harmônicas por meio da análise espectral trata-se de um desafio difícil que depende de diversos fatores. Desta forma, um conceito de agrupamento em frequência é introduzido por meio da norma IEC 61000-4-7 (IEC, 2002). A norma utiliza análise de Fourier para componentes de até 9 kHz utilizando uma janela de 10 ciclos da frequência fundamental de 50 Hz e uma janela de 12 ciclos da frequência fundamental de 60 Hz, as janelas são retangulares de 200 ms, ou seja, uma resolução de 5 Hz, o que significa que a amostragem é sincronizada com a frequência da rede utilizando o PLL (HANZELKA; BIEN, 2004).

O conceito de agrupamento em IEC 61000-4-7 é aplicado utilizando grupos e sub-grupos harmônicos e inter-harmônicos dos valores de amplitude em raiz do valor quadrático médio (RMS, do inglês *Root Mean Square*) do espectro obtido ao aplicar a DFT. A aplicação das técnicas de grupos e subgrupos presume que a energia espalhada nos demais componentes podem ser agrupadas obtendo um valor equivalente e muito próximo da energia do componente original direcionando para o valor correto de amplitude.

A teoria por trás do agrupamento tem relação com o teorema de Parseval, que se dá pela equivalência da energia de um sinal no domínio do tempo que é mantida no domínio da frequência. A expressão para sinais contínuos e infinitos é dada por

$$\int_{-\infty}^{\infty} [g(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.13)$$

onde $g(t)$ é o sinal no tempo e $G(j\omega)$ é a transformada de Fourier complexa do sinal.

Ao atribuir as condições dos sinais que são operados, isto é, sinais discretos, limitados por janelas e periódicos tem-se a seguinte expressão

$$\sqrt{\frac{1}{N_w} \sum_{i=1}^{N_w} [g(t_i)]^2} = \sqrt{\sum_{j=0}^{N_w/2} |C_k|^2} \quad (2.14)$$

onde $g(t_i)$ são os valores do sinal amostrado no tempo para $t_i = i \cdot T_w / N_w$, sendo T_w o período da janela e N_w o número de amostras de uma janela dado por $N_w = f_s \cdot T_w$ para

uma frequência de amostragem f_S que atenda o critério de Nyquist, ou seja, $f_S \geq 2 \cdot f_{\max}$ (frequência máxima) para que todos os coeficientes C_k sejam calculados. Os conteúdos de ambos os lados da Eq. 2.14 são em valores RMS (IEC, 2002).

Baseado na relação de Parseval os grupos e subgrupos são aplicados considerando que o espectro representa a energia total do sinal e que a energia dos componentes individuais e suas frequências.

2.3 Estado da Arte

As diversas linhas de pesquisa e trabalhos realizados que relatam agrupamento de frequência são abordadas nessa seção. Destacando as continuidades e o aprimoramento da norma IEC 61000-4-7, além disso, as pesquisas alternativas para o desenvolvimento de novas técnicas de agrupamento de frequência.

Em Chang et al. (2004) é proposto um novo método de agrupamento baseado no conceito de frequência do grupo (FG) em uma banda de frequência cujas as características das componentes são preservadas para uma componente equivalente e a frequência é obtida para um mesmo índice de qualidade de energia específica, sendo desconsiderada a fase de uma FG pois não impacta nos índices de qualidade de energia. Os autores abordaram simulações realizadas para corrente de carga de controladores de ciclo integral (ICCs, do inglês *Integral Cycle Controllers*) obtiveram o espectro da corrente que possuía inter-harmônicas. Desta forma, foram aplicados os conceitos de FG para analisar as inter-harmônicas de forma mais clara e concluíram que as frequências de grupo melhor preservam as características das componentes do espectro original em comparação ao método padrão IEC.

A avaliação de grupo e subgrupo da norma IEC 61000-4-7, no que se refere a integridade e o funcionamento preciso do método quando submetido a componentes inter-harmônicas e o vazamento espectral, é abordado por Bracale et al. (2008) que propõem realização de técnicas avançadas de estimação espectral, tais como: Prony adaptativo, a estimação de parâmetros de sinal via técnicas de invariância rotacional (ESPRIT, do inglês *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) e root-MUSIC (do inglês, *root Multiple-Signal Classification*). O trabalho realiza um ajuste na forma de onda e a aplicação do agrupamento IEC em seguida, além disso, mostra a redução à sensibilidade da não sincronização de frequência e dos efeitos do vazamento espectral.

No contexto das dificuldades em medir, precisamente, frequência e amplitude das inter-harmônicas o trabalho do Lin (2008) propõe uma distribuição de ponderação de frequência de grupo harmônico, conceito baseado na norma IEC-60001-4-7, para avaliação de inter-harmônica em sistemas de potência a partir do método baseado em FFT. O método é baseado no cálculo da proporção de distribuição de energia em torno das

frequências adjacentes em cada harmônico para determinar a frequência inter-harmônica. Em outras palavras, para o autor o método abordado é responsável pela restauração da energia dispersiva do vazamento espectral causada pela DFT (ou FFT).

Demais trabalhos foram desenvolvidos utilizando a ferramenta da FFT com o conceito de grupo harmônico. Desta forma, [Lin, Chen e Liu \(2011\)](#) desenvolveram um algoritmo iterativo de minimização de distribuição de energia de grupo harmônico (GEDM, do inglês *Group-harmonic Energy Distribution Minimizing*), o algoritmo proporciona, da mesma forma que o trabalho anterior, a restauração da energia dispersiva do vazamento espectral causada pela FFT. Outro algoritmo também é desenvolvido seguindo os mesmos conceitos principais anteriores, o algoritmo de restabelecimento de energia de grupos harmônicos com sobreposição de partes (PGER, do inglês *Piecewise-overlapped Group-harmonic Energy Restoring*), esse algoritmo é abordado em outro trabalho desenvolvido por [Lin, Huang e Liu \(2013\)](#). Ambos os algoritmos fazem parte de um conceito de energia de grupo harmônico.

[Chang et al. \(2008\)](#) abordaram um algoritmo aprimorado baseado em FFT para medição de harmônicas e inter-harmônicas. O aprimoramento é dado pela aplicação da interpolação no domínio da frequência adotada para obter a frequência fundamental e componentes inter-harmônicas. Há, também, uma aplicação do polinômio interpolador para reconstrução do sinal no domínio do tempo. Os autores mostraram que para aplicação da interpolação no domínio da frequência é possível reduzir os problemas de vazamento espectral e os seus efeitos associados. Na mesma linha de pesquisa, [Monteiro et al. \(2014\)](#) avaliaram de forma comparativa o método de interpolação no domínio do tempo e método de interpolação no domínio da frequência, ambas as técnicas aplicadas para calcular os grupos e subgrupos de harmônicas e inter-harmônicas da norma IEC 61000-4-7. Os autores observaram que as técnicas de interpolações permitem desvios na frequência sendo que as mesmas funcionam em cenários de amostragem assíncrona.

Uma proposta de melhorar o método de agrupamento IEC 61000-4-7 é abordada em [Hui et al. \(2012\)](#), trata-se de melhorar o agrupamento de inter-harmônicas a partir da separação das componentes inter-harmônicas e harmônicas no espectro, de forma a aplicar o agrupamento somente no espectro inter-harmônico obtido por meio de estimativa dos valores de vazamento espectral causado pelas mesmas. Os autores afirmam que a interferência espectral entre as harmônicas e inter-harmônicas é fortemente reduzida, aumentando a precisão das informações (frequência, amplitude e ângulo de fase) das componentes do sinal. Seguindo a mesma linha de pesquisa, [Yuan et al. \(2014\)](#) propuseram o método de separação de harmônica e inter-harmônica, mas utilizando uma técnica diferente do trabalho anterior, onde o vazamento espectral é removido para melhorar a precisão das medidas, quando a amostragem é assíncrona com a resolução. De acordo com os autores, a aplicação do método em tempo real atinge as exigências inerentes da

simulação.

Os trabalhos mencionados apresentam mudanças e acréscimos no método proposto pela norma IEC 61000-4-7, adotando o conceito de agrupamento e propondo outras técnicas para agrupar componentes harmônicas e inter-harmônicas. A ideia que se conclui, a partir de uma revisão da literatura a respeito dos trabalhos que utilizam os métodos de agrupamento, é que os resultados do IEC 61000-4-7 geram discrepâncias que afetam a proposta do método.

3 Metodologia

Neste capítulo, serão abordadas as ferramentas utilizadas na realização das simulações, tais como, os algoritmos IEC 61000-4-7 e o Chang. Em seguida, uma descrição detalhada dos métodos de agrupamento do IEC 61000-4-7 e do [Chang et al. \(2004\)](#) é apresentada, como também, dos indicadores de distorção e energia do espectro que serão os parâmetros de avaliação dos métodos. Para avaliação dos métodos, os testes de sensibilidade à amplitude e frequência são apresentados e detalhados, pois os métodos serão submetidos aos mesmos. As estratégias de reconstrução do sinal são apresentadas como sendo os métodos propostos, desta forma, será feita uma avaliação da reconstrução do sinal no domínio do tempo das propostas apresentadas.

3.1 Materiais

3.1.1 Método padrão IEC 61000-4-7

A norma IEC 61000-4-7 padroniza um método de medições de componentes de frequências que estão na faixa de até 9 kHz acima da frequência fundamental do sistema elétrico de 60 Hz, ou 50 Hz, aplicado em outros sistemas ([IEC, 2002](#)). A norma estabelece uma série de procedimentos e instrumentações para a realização das medições e do monitoramento das frequências harmônicas e inter-harmônicas.

A etapa da norma IEC que será abordada e aprofundada neste trabalho é método de agrupamento de componentes, em outras palavras, métodos de grupos e subgrupos. A base fundamental dos métodos é a análise de Fourier, onde primordialmente a aplicação da DFT usando uma janela retangular no domínio do tempo de 200 ms, cerca de 12 ciclos de 60 Hz, que equivale, no domínio da frequência, em uma resolução de 5 Hz.

Os grupos e subgrupos harmônicos são definidos para 60 Hz, respectivamente, pela Eq. [3.1](#) e [3.2](#) mostradas a seguir.

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-6}^2}{2} + \sum_{i=-5}^5 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+6}^2}{2} \quad (3.1)$$

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (3.2)$$

Onde, os valores $G_{g,n}$ e $G_{sg,n}$ caracterizam as magnitudes do n -ésimo grupo e n -ésimo subgrupo harmônicos em RMS, o C_k é o valor RMS da componente espectral na frequência harmônica k -ésima. Desta forma, a Eq. [3.1](#) mostra que o grupo harmônico é feito utilizando 6 componentes anteriores e 6 componentes posteriores em relação ao

componente harmônico de referência. Já a Eq. 3.2 mostra que para o subgrupo harmônico leva em consideração 1 componente anterior e 1 posterior ao componente harmônico de referência.

As frequências harmônicas dos grupos e dos subgrupos são definidas como as próprias frequências dos componentes harmônicos de análise.

Os grupos e subgrupos inter-harmônicos são apresentados para 60 Hz, respectivamente, pela Eq. 3.3 e 3.4.

$$G_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^{11} C_{k+i}^2 \quad (3.3)$$

$$G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^{10} C_{k+i}^2 \quad (3.4)$$

Onde, os valores $G_{ig,n}$ e $G_{isg,n}$ caracterizam as magnitudes do n -ésimo grupo e n -ésimo subgrupo inter-harmônicos em RMS, o C_k é o valor RMS da componente espectral adjacente na menor frequência harmônica k -ésima. A Eq. 3.3 mostra que o grupo inter-harmônicos é feito utilizando as componentes entre dois harmônicos, sem incluí-los. Já a Eq. 3.4 mostra que para o subgrupo inter-harmônico é utilizado as componentes entre dois harmônicos, sem incluí-los e sem incluir seus adjacentes.

As frequências inter-harmônicas de grupo e subgrupo são definidas pela Eq. 3.5, mostrada a seguir.

$$f_{ihg,n} = f_{ihsg,n} = \frac{f_{n_h} + f_{n_h+1}}{2} \quad (3.5)$$

Onde, $f_{ihg,n}$ e $f_{ihsg,n}$ são, respectivamente, frequências inter-harmônicas de grupo e subgrupo. E n_h é a ordem harmônica. Portanto, a frequência é obtida através da média entre duas frequências harmônicas consecutivas (IEC, 2002)(ABADA, 2018)

3.1.1.1 Aplicação de grupos e subgrupos

A Figura 10 apresenta de forma gráfica e ilustrativa em barras espectrais (valores em RMS) a aplicação de grupos e subgrupos harmônicos em um sinal demonstrativo. É ilustrado apenas os harmônicos até a 5º ordem e as respectivas inter-harmônicas.

É possível observar na Fig. 10 que os grupos e subgrupos são aplicados entorno das harmônicas de acordo com os limites impostos na Eq. 3.1 e 3.2. Conforme mostrado, os subgrupos são aplicados na componente fundamental, 3º e 5º harmônico (60, 180 e 300 Hz, respectivamente). Nos grupos harmônicos, são aplicados nos harmônicos pares, isto é, 2º e 4º (120 e 240 Hz, respectivamente). Trata-se de uma aplicação meramente ilustrativa, com o intuito de apresentar de forma clara os grupos e subgrupos harmônicos. Ou seja, aplicação de acordo com a padrão IEC 61000-4-7 é feita apenas com os grupos ou subgrupos harmônicos combinados com os grupos ou subgrupos inter-harmônicos.

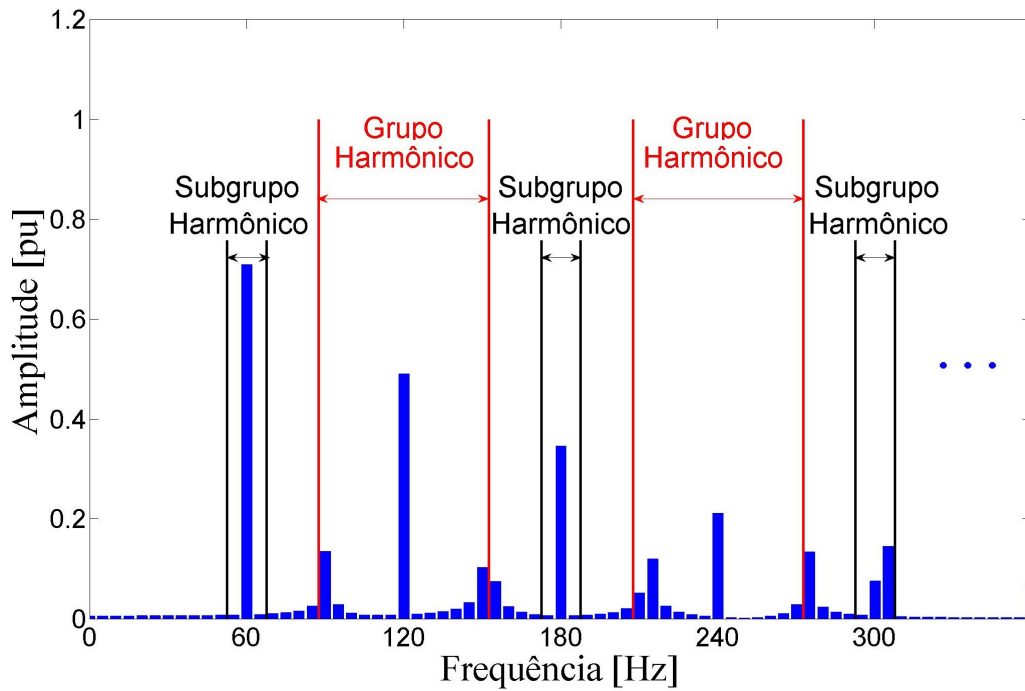


Figura 10 – Representação gráfica dos grupos e subgrupos harmônicos.

E para a aplicação de grupos e subgrupos inter-harmônicos é mostrado na Fig. 11 para as mesmas configurações da Fig. 10.

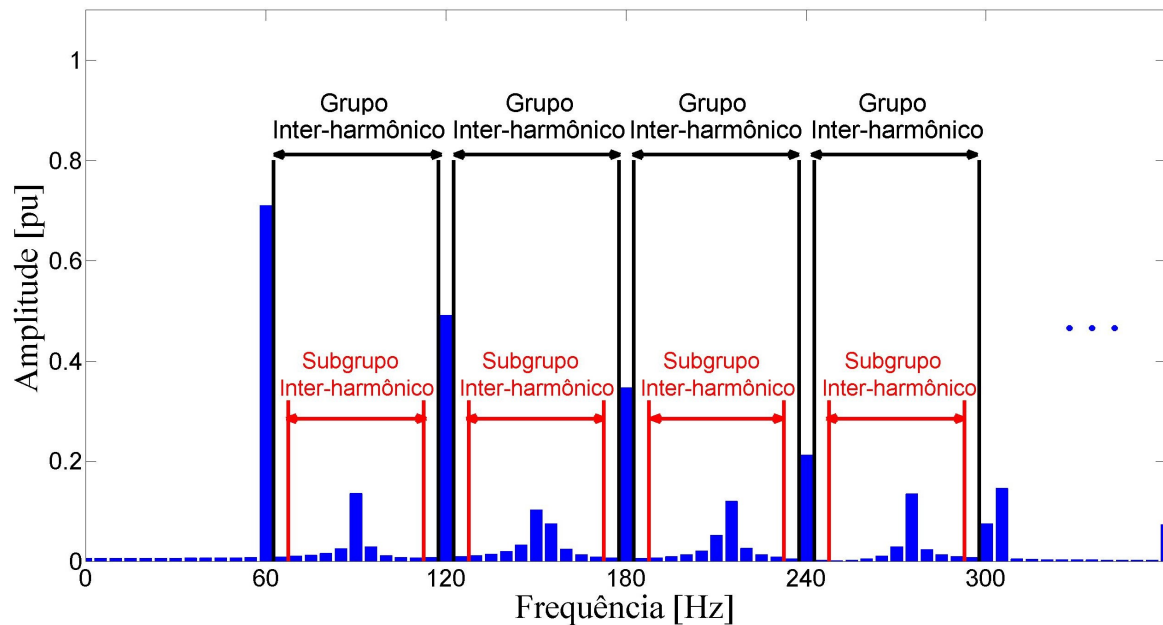


Figura 11 – Representação gráfica dos grupos e subgrupos inter-harmônicos.

Na Figura 11, os grupos e subgrupos inter-harmônicos são aplicados entre dois harmônicos adjacentes conforme os limites da Eq. 3.3 e 3.4. De acordo com a Fig. 11, os

grupos e subgrupos estão posicionados entres as componentes: 60 e 120 Hz; 120 e 180 Hz; 180 e 240 Hz; 240 e 300 Hz.

O IEC permite as seguintes configurações de grupos e subgrupos:

- Grupo harmônico e subgrupo inter-harmônico;
- Subgrupo harmônico e grupo inter-harmônico;
- Grupo harmônico e grupo inter-harmônico;
- Subgrupo harmônico e subgrupo inter-harmônico.

As configurações apresentadas serão implementadas e simuladas conforme a norma IEC 61000-4-7. E conforme a norma ABNT NBR IEC 61000-4-30 (ABNT, 2011), é selecionada uma configuração que melhor atende às integridades dos índices globais de distorção (OLIVEIRA, 2015)(ABNT, 2011), isto é, a configuração de subgrupo harmônico e subgrupo inter-harmônico. Portanto, neste trabalho, para avaliação do método IEC será abordado somente os subgrupos harmônicos e subgrupos inter-harmônicos.

3.1.1.2 Algoritmo de agrupamento IEC 61000-4-7

Na Fig. 12 é ilustrado o algoritmo de agrupamento IEC por subgrupos harmônicos e inter-harmônicos por meio de um fluxograma. Para mais detalhes, o algoritmo está disponível no apêndice C.2.

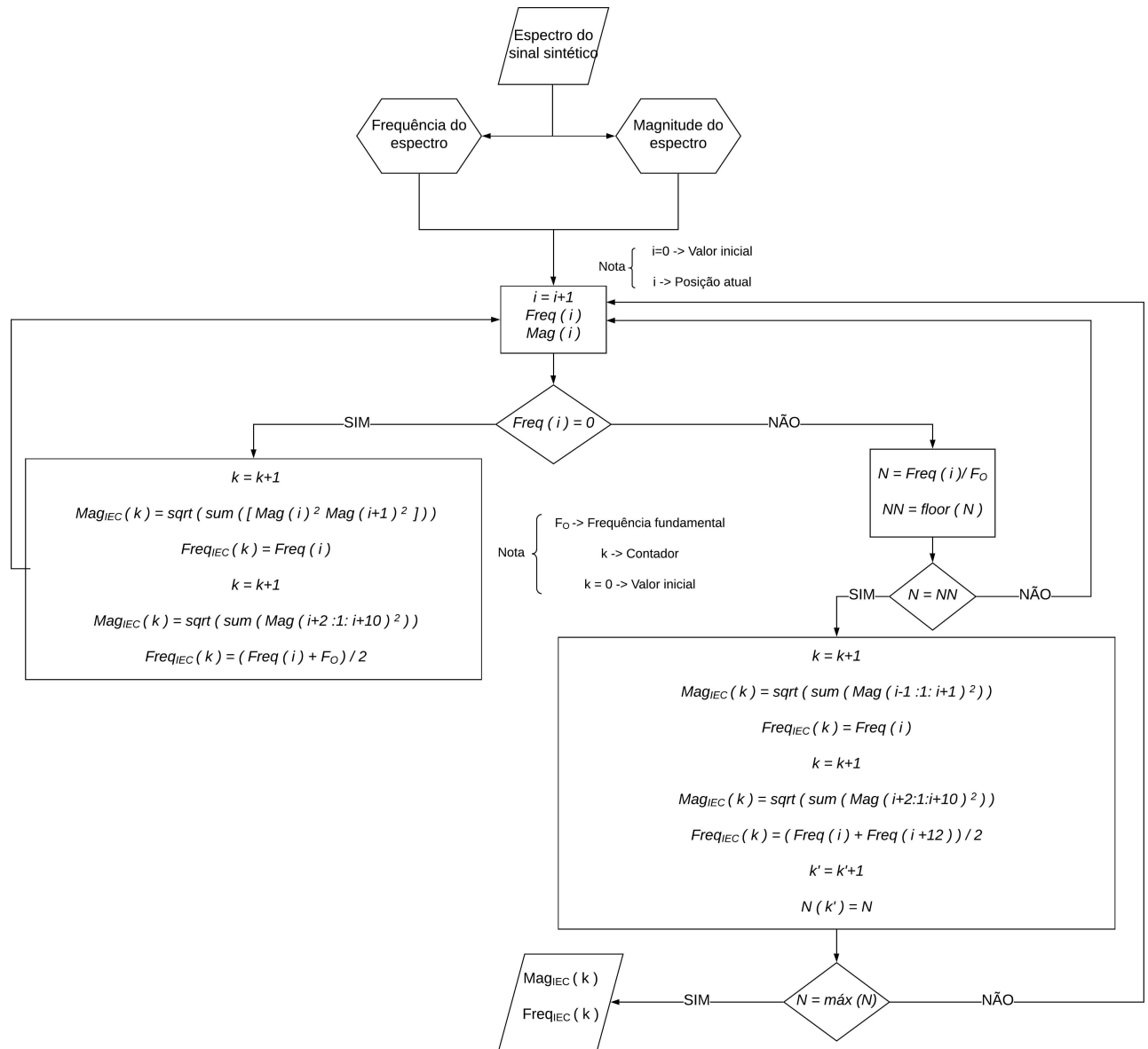


Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de agrupamento IEC 61000-4-7.

3.1.2 Método Chang

O método Chang, conforme já abordado na seção 2.3, é um método desenvolvido por Chang et al. (2004) cuja a ideia é baseada na frequência do grupo (FG) em uma determinada banda de frequência de sequência dominante. A determinação dessa banda de frequência parte da ideia de caracterizar as frequências harmônica e inter-harmônicas pela sequência de fase, após isso, para uma faixa de frequência uma sequência dominante é encontrada, seja ela, positiva, negativa ou zero será caracterizada como banda de frequência de sequência dominante. Cada FG tem o mesmo índice de qualidade de energia que as demais componentes de frequência da banda caracterizada.

Em um sistema trifásico balanceado de energia, tem-se a componente fundamental com a sequência positiva, a segunda harmônica com a sequência negativa e a terceira

harmônica com sequência zero. Na Figura 13 apresenta um esquemático do diagrama fasorial das sequências de fases das harmônicas de correntes de carga avaliada por Chang et al. (2004).

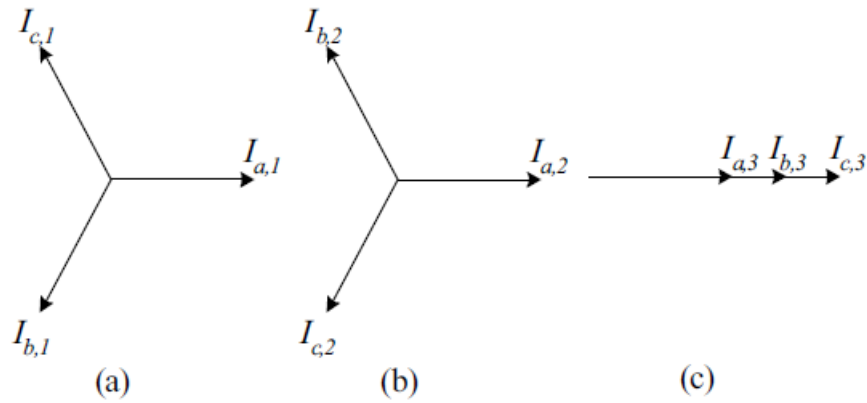


Figura 13 – Diagramas fasoriais das harmônicas: (a) componente fundamental (sequência positiva); (b) segunda harmônica (sequência negativa); (c) terceira harmônica (sequência zero). Fonte: (CHANG et al., 2004).

Assim como nas harmônicas, as inter-harmônicas possuem uma representação em diagrama fasorial das sequências de fases que os correspondem, tal como mostra na Fig.14.

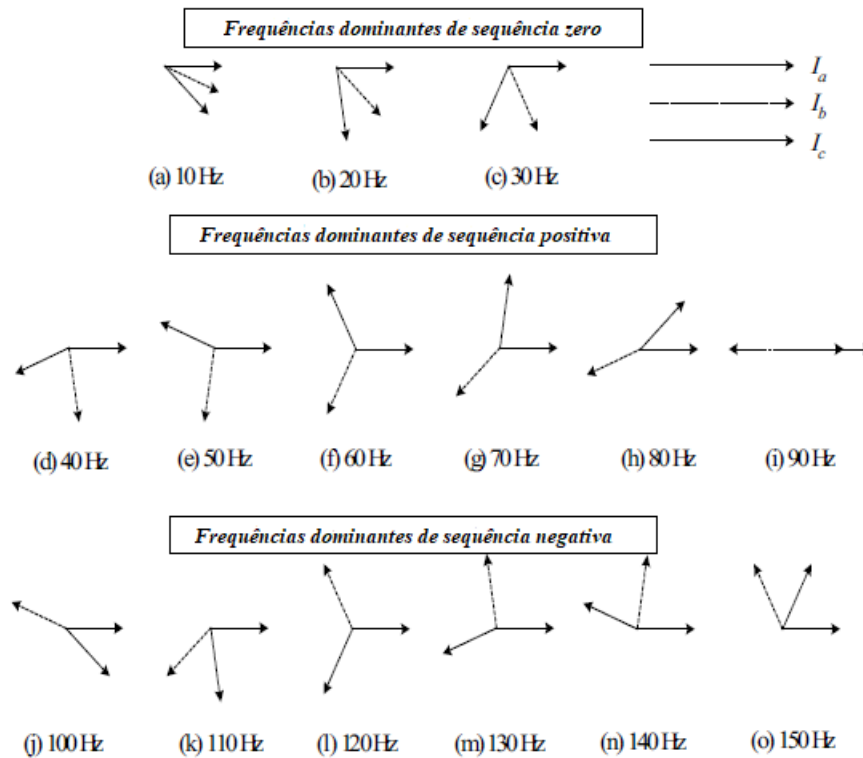


Figura 14 – Diagramas fasoriais das harmônicas e inter-harmônicas de correntes de carga. Fonte: Adaptado de Chang et al. (2004).

Chang et al. (2004) analisam as inter-harmônicas e os harmônicas inteiras para uma frequência fundamental de 60 Hz cujo o período da corrente de carga é $6/f_o = 1/10$ s, ou seja, as componentes ocorrem em 10, 20, 30, ... Hz. Para componente de frequência f -ésima, a fase A avança a fase B em $20f$ graus e a fase B avança a fase C em $20f$ graus. Desta forma, foi concluído e apresentado na Fig. 14 que as componentes possuem defasagens entre as fases e as componentes ocorrem em todas as sequências, não em uma apenas. E para qualquer frequência uma sequência será dominante, conforme foi mostrado na Fig. 14.

A Figura 15 ilustra as bandas de frequências de sequências dominantes que serão incluídas no processo de agrupamento.

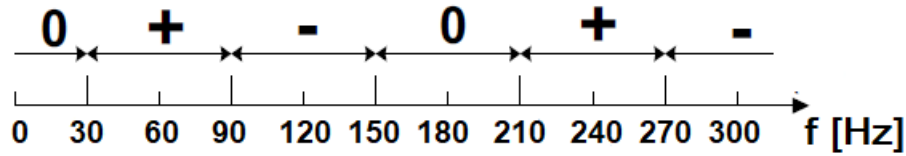


Figura 15 – Bandas de frequências de sequência dominante para 60 Hz. Fonte: Adaptado de Chang et al. (2004).

As bandas de frequências cuja as sequencias predominam são descritas para sequência positiva, negativa e zero:

- Sequência positiva é dominante de $(3N + 0, 5)f_o$ à $(3N + 1, 5)f_o$ Hz, $N = 1, 2, 3 \dots$
- Sequência negativa é dominante de $(3N + 1, 5)f_o$ à $(3N + 2, 5)f_o$ Hz, $N = 1, 2, 3 \dots$
- Sequência zero é dominante de $(3N - 0, 5)f_o$ à $(3N + 0, 5)f_o$ Hz, $N = 1, 2, 3 \dots$

Conforme mostrado na Fig. 15, os símbolos ‘0’, ‘+’ e ‘-’ representam as sequências zero, positiva e negativa, respectivamente. De forma geral, as bandas de frequências de sequência dominante, $(N - 0, 5)f_o$ à $(N + 0, 5)f_o$, são escolhidas como a banda de frequência de um grupo de frequências. A FG é, fisicamente, um componente equivalente dos componentes pertencentes à banda de frequências de sequência dominante baseado no mesmo impacto de qualidade de energia (CHANG et al., 2004). Uma FG possui amplitude e frequência, a fase não é considerada pois não impacta nos índices qualidade de energia, de sendo a amplitude definida pela Eq. 3.6.

$$X_{G,(f_1,f_2)} = \sqrt{\sum_h (X_h)^2} \quad (3.6)$$

Onde, o h é dado por $f_1 < h \leq f_2$. O $X_{G,(f_1,f_2)}$ é o valor RMS da amplitude da FG em uma banda de frequências f_1 à f_2 que é dada pelo teorema de Parseval (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010).

E a frequência de uma FG é obtida para um mesmo índice de qualidade de energia específico K_Ω . Logo, a Equação 3.7 mostra o cálculo da frequência.

$$f_{G,(f_1,f_2)} = \sqrt{K_\Omega} f_o \quad (3.7)$$

Onde, K_Ω é dado pelo fator-K na banda de frequência Ω e f_o é a frequência fundamental. Portanto, K_Ω é expresso pela Eq.3.8, conforme a seguir.

$$K_\Omega = \frac{\sum_{h=m}^n \left(\frac{f_h}{f_o} X_h \right)^2}{\sum_{h=m}^n (X_h)^2} \quad (3.8)$$

Onde, m e n são representados pelos índices mínimos e máximos, respectivamente, em uma banda de frequências de f_1 e f_2 (CHANG et al., 2004).

As frequências f_1 e f_2 representam as frequências limítrofes de duas bandas de frequências de sequência dominante vizinhas. O que implica que a FG pode estar entre f_1 e f_2 .

3.1.2.1 Aplicação da frequência de grupo

A Figura 16 mostra as bandas de frequência de sequência dominante delimitadas no espectro do sinal, cuja a frequência fundamental de 60 Hz.

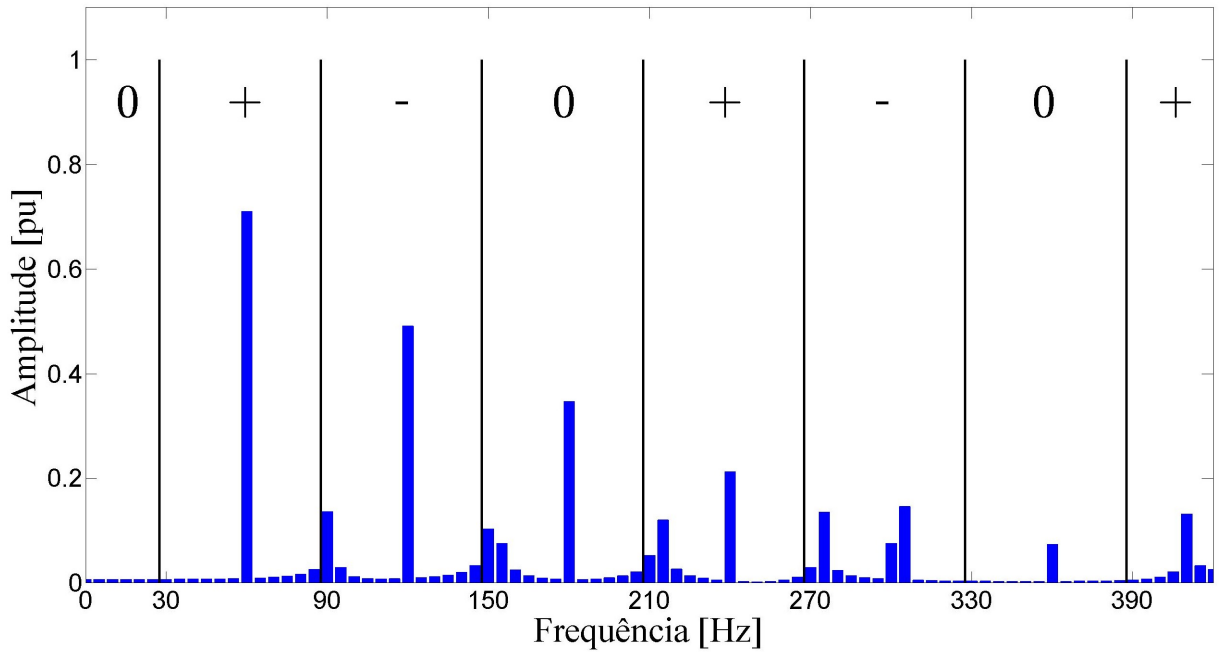


Figura 16 – Bandas de frequências de sequência dominante aplicada no espectro.

Conforme mostra na Fig. 16 as bandas de sequência positiva, negativa e zero são aplicadas e a partir dessas bandas são obtidas as frequências e amplitude da FG. Na

aplicação da Fig. 16 para harmônicas de até 7ª ordem (420 Hz) foram obtidas 8 bandas de frequência de sequência dominante, sendo destas, 3 bandas de sequência zero, 3 bandas de sequência positiva e 2 bandas de sequência negativa. As componentes harmônicas, cuja as barras espectrais são maiores na maioria das bandas, são agregadas nas bandas onde a sua respectiva sequência de fase é dominante. De forma análoga, as inter-harmônicas estão nas bandas de frequências correspondente às suas sequências de fase.

Após a aplicação das bandas de frequências as frequências e amplitudes equivalentes da FG são obtidas como mostra na Fig. 17.

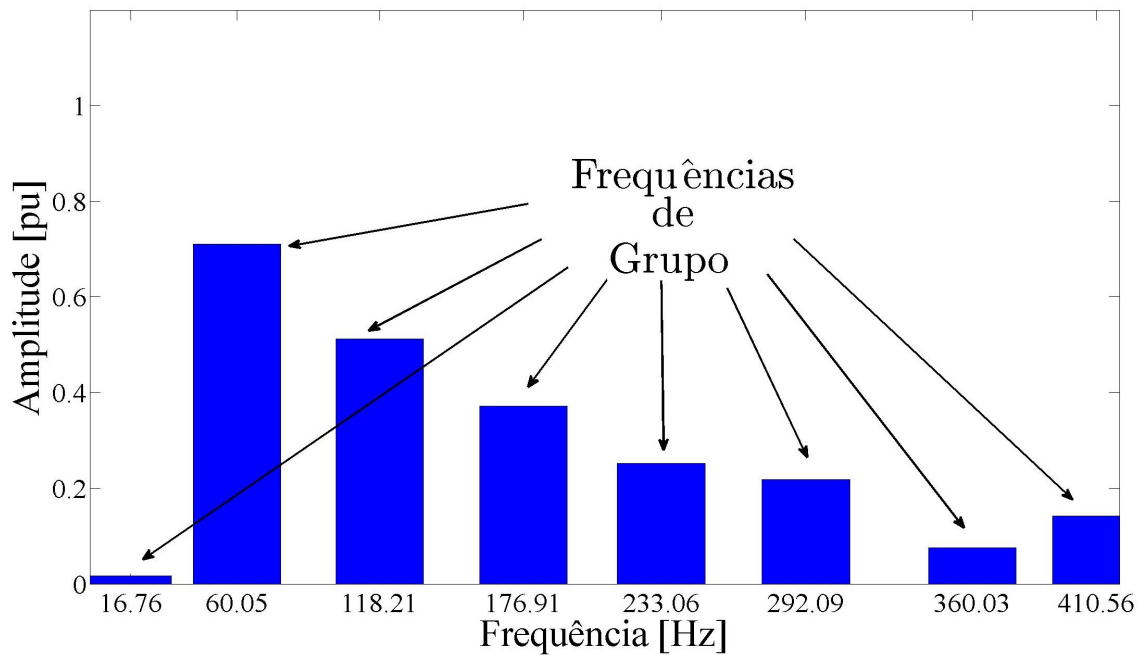


Figura 17 – Amplitudes e frequências equivalentes das FG.

Na Figura 17, apresenta-se o espectro das FG equivalente da Fig. 16, é possível observar uma redução significativa da quantidade de componentes do espectro sem aplicação da FG para a quantidade após a aplicação da FG, isto é, anteriormente havia cerca de 84 barras espectrais e esse resultado foi reduzido para cerca de apenas 8 barras espectrais. O método indica que o índice de qualidade de energia é mantido após a aplicação das FG, ou seja, a frequência de grupo mantém o mesmo índice de qualidade de energia que os demais componentes da banda de frequência. Além disso, demais características, que serão abordadas posteriormente, são preservadas após o agrupamento.

3.1.2.2 Algoritmo de agrupamento Chang

Na Fig. 18 é ilustrado o algoritmo de agrupamento Chang por meio de um fluxograma. Para mais detalhes, o algoritmo está disponível no apêndice C.3.

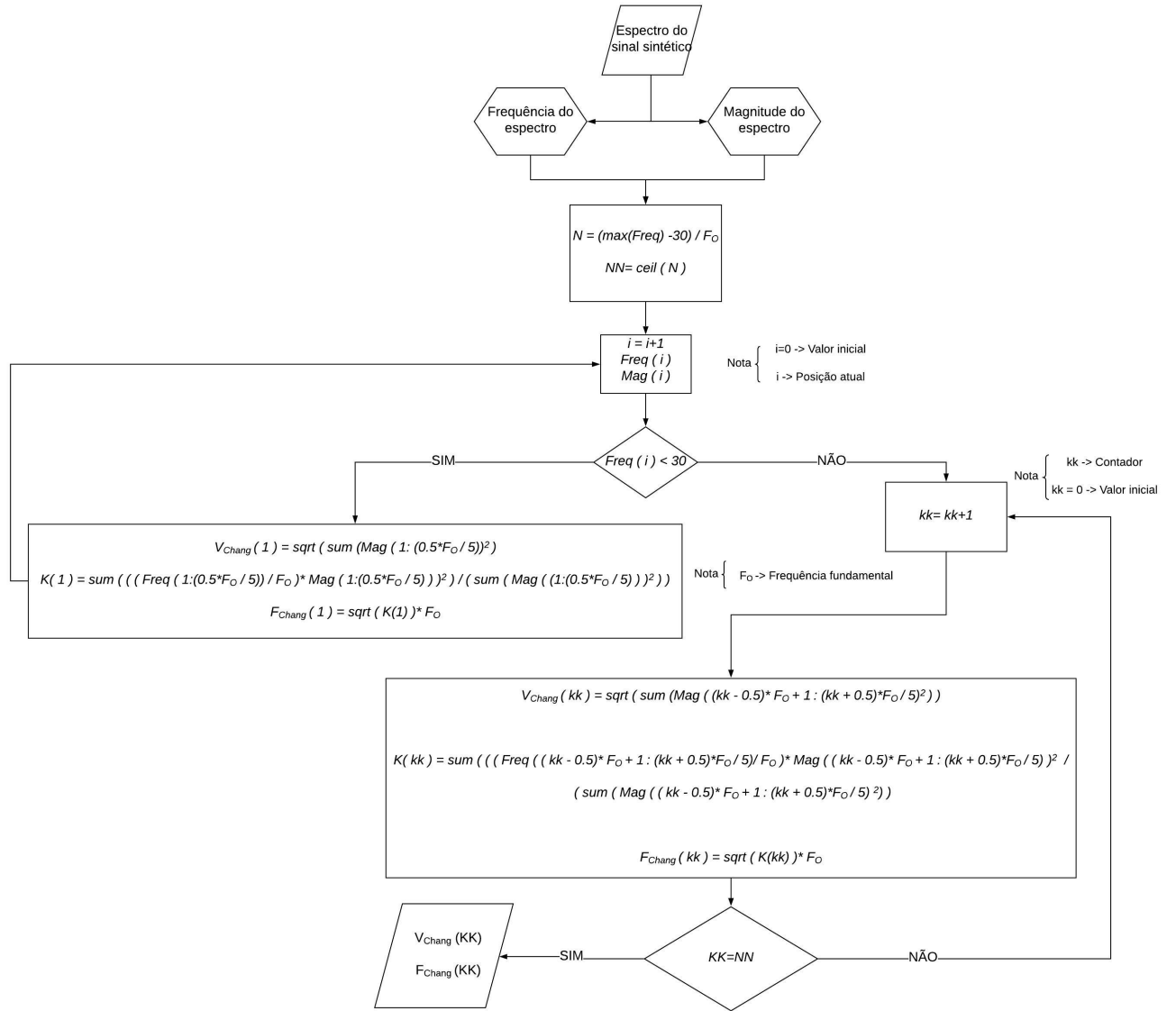


Figura 18 – Fluxograma do algoritmo de agrupamento Chang.

3.1.3 Indicadores de distorção e energia do espectro

Uns dos parâmetros para avaliação dos métodos são os indicadores de distorções apresentados pela norma IEC 61000-4-7 e aplicado aos grupos e subgrupos de harmônicos e inter-harmônicos. A norma define o THDG (do inglês, *Total Harmonic Distortion of Group*) conforme a Eq. 3.9.

$$THDG = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_{g,n}}{G_{g,1}} \right)^2} \quad (3.9)$$

Onde, $G_{g,n}$ é o valor RMS do grupo harmônico de ordem n . A soma é feita até a componente harmônica H , sendo $G_{g,1}$ o valor RMS do grupo da fundamental (IEC, 2002).

De maneira análoga, para indicador de distorção dos grupos inter-harmônicos é apresentado para este trabalho como TIDG (do inglês, *Total Interharmonic Distortion of*

Group) de acordo com a Eq. 3.10.

$$TIDG = \sqrt{\sum_{n=2}^{IH} \left(\frac{G_{ig,n}}{G_{g,1}} \right)^2} \quad (3.10)$$

Onde, $G_{ig,n}$ é o valor RMS do grupo inter-harmônico de ordem n . A soma é feita até a componente inter-harmônica IH , sendo $G_{g,1}$ o valor RMS do grupo da fundamental (IEC, 2002).

A norma IEC 61000-4-7 também define indicador de distorção para subgrupos. O THDS (do inglês, *Total Harmonic Distortion of Subgroup*) é definido pela Eq. 3.11.

$$THDS = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_{sg,n}}{G_{sg,1}} \right)^2} \quad (3.11)$$

Onde, $G_{sg,n}$ é o valor RMS do subgrupo harmônico de ordem n . A soma é feita até a componente harmônica H , sendo $G_{sg,1}$ o valor RMS do subgrupo da fundamental (IEC, 2002).

De maneira equivalente, para indicador de distorção dos subgrupos inter-harmônicos é apresentado para este trabalho como TIDS (do inglês, *Total Interharmonic Distortion of Subgroup*) de acordo com a Eq. 3.12.

$$TIDS = \sqrt{\sum_{n=2}^{IH} \left(\frac{G_{isg,n}}{G_{sg,1}} \right)^2} \quad (3.12)$$

Onde, $G_{isg,n}$ é o valor RMS do subgrupo inter-harmônico de ordem n . A soma é feita até a componente inter-harmônica IH , sendo $G_{sg,1}$ o valor RMS do grupo da fundamental (IEC, 2002).

O cálculo da energia total do espectro, conforme já especificado na seção 2.2.2 pelo teorema de Parseval, a expressão pode ser simplificada como mostra a seguir na Eq. 3.13.

$$Energia = \sqrt{\sum_{k=0}^{N_w/2} |C_k|^2} \quad (3.13)$$

Onde, N_w é o número de amostras da janela de tamanho de 200 ms e C_k é a componente espectral na posição k -ésima dada em RMS. Nota-se que a energia é calculada para os valores em RMS e para metade do espectro devido à simetria da DFT. O cálculo da energia para os grupos e subgrupos é feito substituindo a componente C_k por $G_{g,n}$, $G_{ig,n}$, $G_{sg,n}$ e $G_{isg,n}$. E o termo $N_w/2$ é substituído por n (IEC, 2002).

3.1.4 Teste de sensibilidade à amplitude e frequência

O teste de sensibilidade à amplitude e frequência foi desenvolvido para avaliar cada método, a partir dos parâmetros: indicador de distorção harmônica total ou THD, distorção inter-harmônica total ou TID e energia do espectro. Quando as componentes inter-harmônicas são submetidas às variações de amplitude e frequência.

Inicialmente, o teste de sensibilidade à amplitude foi pensado como uma forma de avaliar a influência das componentes inter-harmônicas, em termos de variação de amplitude, nos parâmetros calculados pelos métodos de agrupamento. Os métodos IEC e o Chang são avaliados de forma comparativa com os parâmetros originais do sinal. A Figura 19, apresenta um esquemático gráfico da variação da amplitude no domínio da frequência.

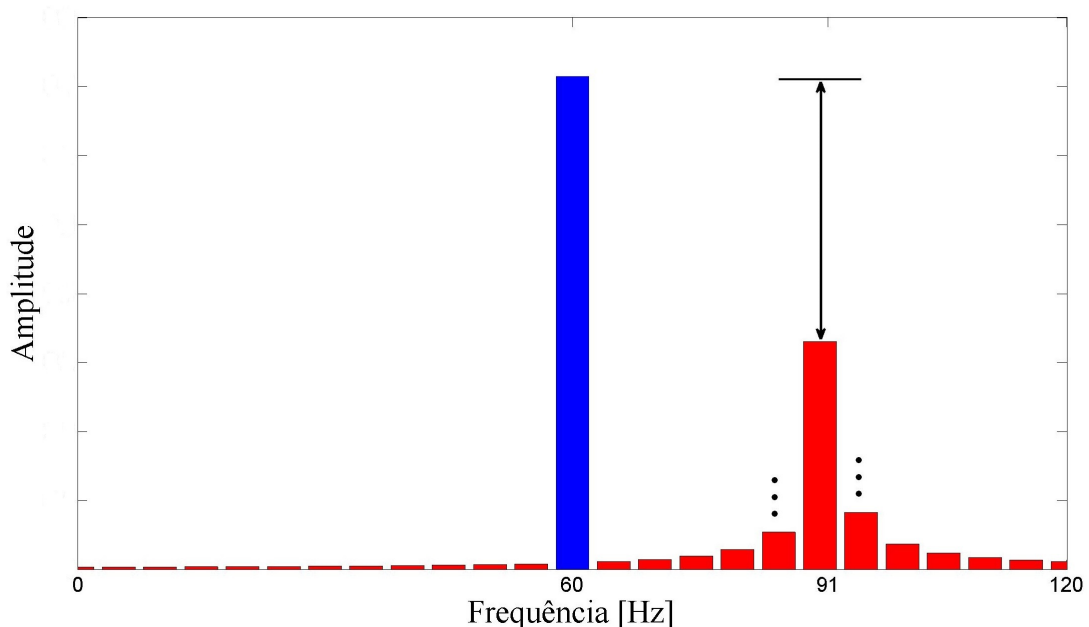


Figura 19 – Representação gráfica da variação da amplitude da componente inter-harmônica.

Na Figura 19, a ilustração da variação de amplitude é feita para uma frequência fixada em 91 Hz, por exemplo, que seria uma frequência inter-harmônica e não múltipla da resolução (5 Hz), causando, assim, o vazamento espectral. É representada, também, pelas reticências as variações do vazamento espectral quando mudada a amplitude. Além disso, a amplitude varia de 0% a 100% da componente fundamental (60 Hz) e o passo incremental da variação de 1%.

No teste de sensibilidade à frequência, conforme mostra na Fig. 20, é feito variando um componente de frequência de um valor a outro e mantendo a amplitude fixa, para a Fig 20, por exemplo, a amplitude foi de 0.2% da componente fundamental. A execução do teste completo é feito variando a amplitude conforme o teste sensibilidade à amplitude. Além disso, a variação é 5 em 5 Hz (Fig. 20) excluindo as posições da fundamental e harmônicas,

ou seja, a componente percorre todo o espectro e “pula” a frequência fundamental e suas harmônicas. O motivo para excluir essas frequências é claro, pois se a componente que percorre o espectro estiver nessas posições se torna uma fundamental ou uma harmônica.

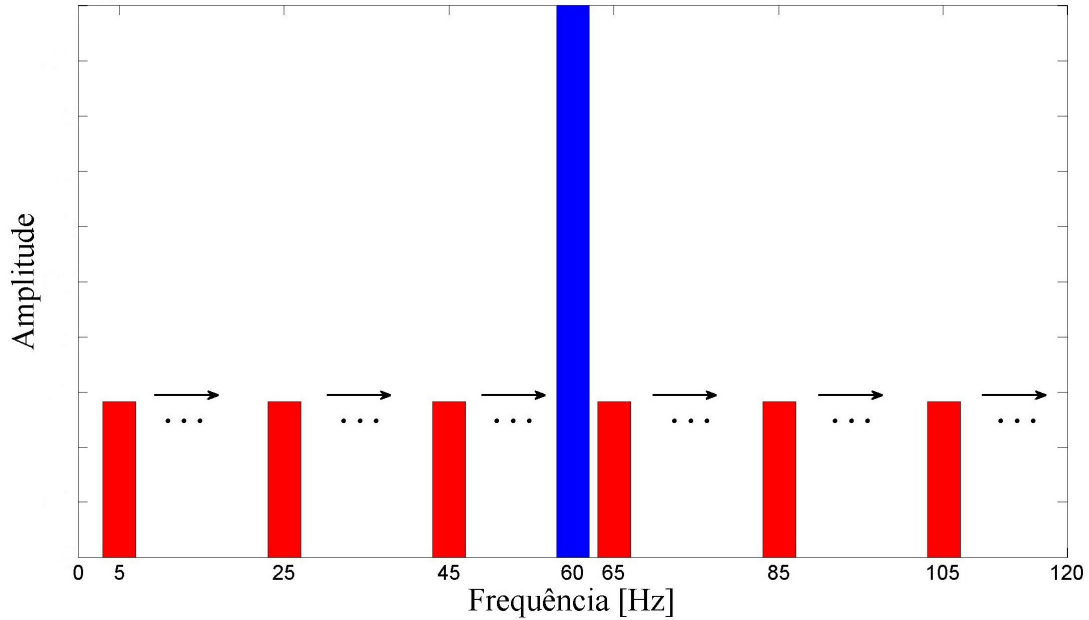


Figura 20 – Representação gráfica da variação da frequência da componente inter-harmônica com intervalo de 5 Hz.

A ilustração da Fig. 20 é apenas um retrato da dinâmica da variação da frequência, porém, para intervalos de variação de 5 Hz não geram vazamentos espectrais, consequentemente, não influenciam nas demais componentes harmônicas ou na fundamental. Portanto, o teste é aplicado com intervalos de variação de 3 Hz para que seja possível avaliar as influências das frequências nos métodos IEC e Chang.

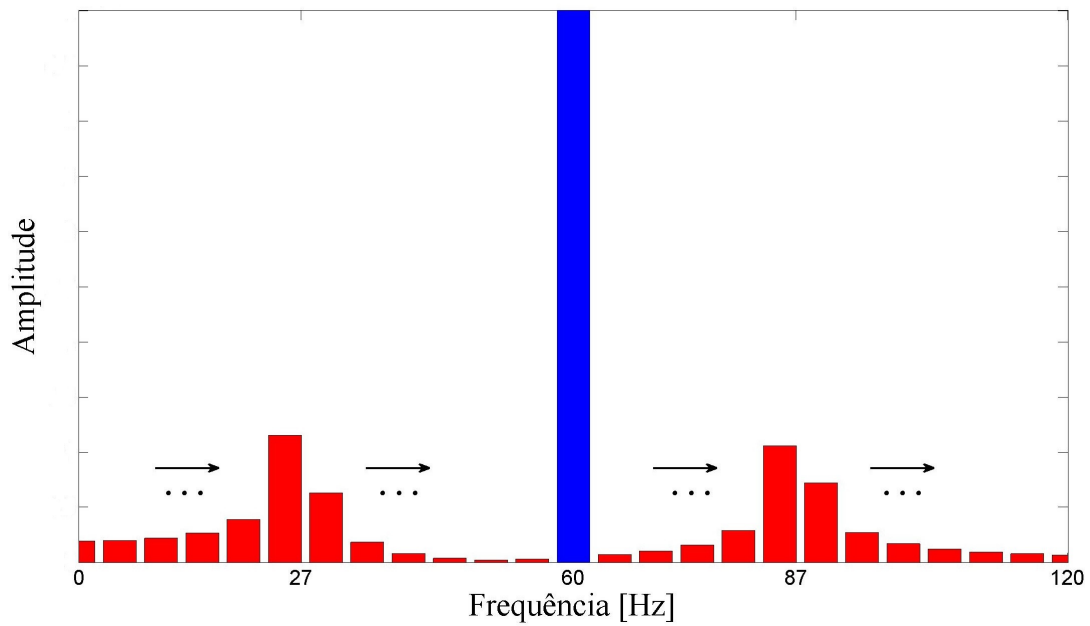


Figura 21 – Representação gráfica da variação da frequência da componente inter-harmônica com intervalo de 3 Hz.

A Figura 21 mostra a dinâmica da variação da frequência com intervalo de 3 Hz que geram vazamentos espectrais. A ilustração passa a ideia de que para cada posição de frequência múltipla de 3 o vazamento espectral é diferente, ou seja, as amplitudes variam devido às distâncias para as componentes harmônicas e fundamental.

De modo geral, o teste para amplitude e para frequência é detalhado conforme o fluxograma apresentado na Fig. 22.

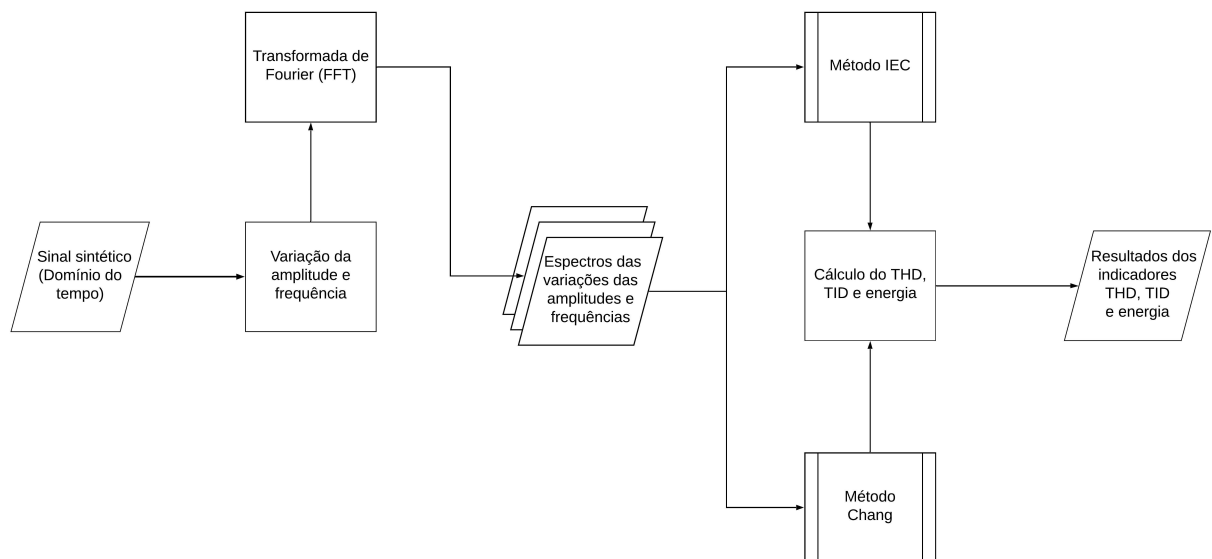


Figura 22 – Fluxograma do teste de sensibilidade à amplitude e frequência.

No fluxograma é destacado cada etapa para obter os resultados dos indicadores THD, TID e energia do espectro de cada variação de amplitude e frequência para os métodos IEC e Chang. A entrada do fluxograma são sinais sintéticos sem inter-harmônicas, somente com harmônicas, porque na etapa de variação de amplitude e frequência é adicionada a componente inter-harmônica para a variação. Os métodos são aplicados simultaneamente, para cada variação da amplitude realiza-se a variação em frequência. E de acordo com cada variação individual resulta em um sinal é gerado, lembrando que essa etapa ocorre no domínio do tempo, e em seguida é aplicada a FFT no sinal gerado. No espectro resultante é aplicado os métodos de agrupamento IEC e o Chang de acordo com as seções 3.1.1 e 3.1.2.

Após a aplicação do agrupamento, calcula-se os indicadores THD, TID e energia conforme a seção 3.1.3, mas vale destacar que para o método Chang são calculados apenas os THD e as energias. Os motivos estão relacionados às características e às configurações do método. Por fim, os resultados são obtidos para a avaliação comparativa entre os métodos e aos valores teóricos originais e as inferências são tiradas sobre a sensibilidade à amplitude e frequência dos métodos.

3.2 Métodos

3.2.1 Reconstrução dos sinais após agrupamento IEC 61000-4-7 e o método Chang com as fases predominantes

A reconstrução abordada no domínio do tempo é feita após a aplicação do agrupamento pela norma IEC 61000-4-7 e pelo método Chang, o espectro é construído com as amplitudes e frequências equivalentes dos grupos e subgrupos. Para o método Chang o espectro é obtido a partir das amplitudes e das FG. A fase, em ambos os métodos, é a predominante de acordo com as frequências que construíram a magnitude do espectro. Ao tomar o sinal $x_2(t)$ (Eq. 2.10), que possui inter-harmônica, como exemplo para ilustrar o espectro agrupado da magnitude em RMS e com as fase predominantes.

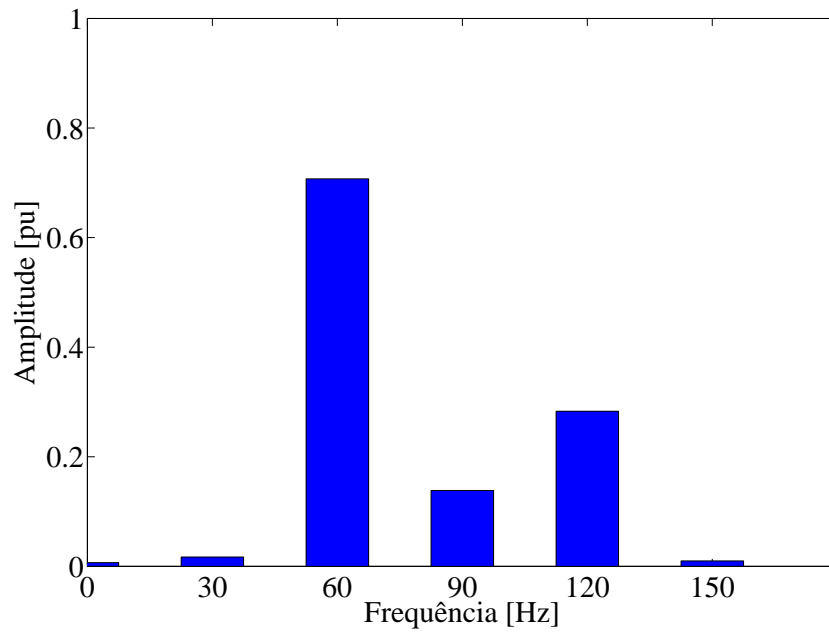


Figura 23 – Espectro de amplitude resultante do agrupamento pelo método IEC 61000-4-7.

Na Figura 23, é possível notar que nas frequências CC, 30 Hz e 150 Hz que são resultados da aplicação dos subgrupos, as amplitudes possuem valores mínimos (próximos a zero). Isto é, somente as frequências 60, 90 e 120 Hz são predominantes e, ao obter espectro de fase original do sinal (sem agrupamento) do sinal, foram selecionadas as fases com as respectivas frequências resultantes do agrupamento, como mostrado na Fig. 24.

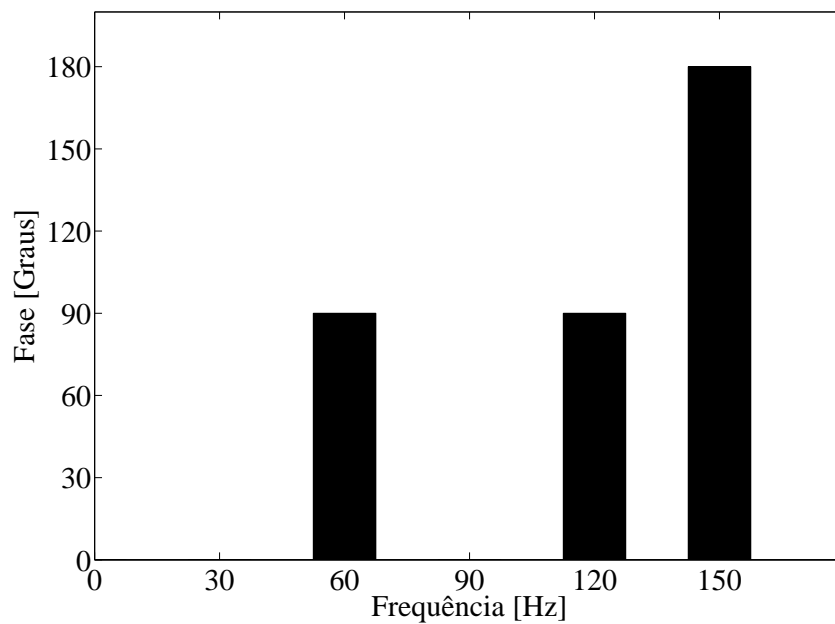


Figura 24 – Espectro de fase das frequências resultantes do agrupamento.

Portanto, nessa etapa as demais fases foram negligenciadas e o sinal reconstruído apenas com as fases das respectivas frequências de agrupamento.

Para o método Chang, nota-se pela Fig. 17 que as frequências associadas as FG não são valores inteiros. Ou seja, para a reconstrução as frequências são aproximadas para o número inteiro mais próximo e múltiplo da resolução 5 Hz.

3.2.2 Reconstrução dos sinais após os algoritmos propostos de ajuste na frequência do agrupamento IEC 61000-4-7

Conforme a norma IEC 61000-4-7 a frequência representante da aplicação do grupo e subgrupo inter-harmônico é dada pela Eq. 3.5. Trata-se de uma média entre as frequências harmônicas que circunvinham a inter-harmônica. Nesse sentido, se houver inter-harmônicas distantes do valor médio atribuído implica que o espectro equivalente não representa ou não está próximo dos verdadeiros valores na frequência, consequentemente, a reconstrução desse sinal com esse espectro apresentará uma distorção inclusa pela frequência equivocada do agrupamento inter-harmônico.

Desta forma, surge a ideia de reposicionar a frequência inter-harmônica a partir do comportamento do vazamento espectral, conforme é classificado e abordado na Seção 2.2.2. A construção da proposta de ajuste da frequência passa pelo entendimento sobre os *long range leakage* e *short range leakage*, pois caracterizam o perfil do vazamento espectral.

No entanto, para o início desse estudo, este trabalho analisou os tipos de vazamento e os seus efeitos separados em harmônicas consecutivas, isto é, não houve mais de uma inter-harmônica entre duas harmônicas consecutivas. Tratando-se de um estudo inicial e prévio, é possível constatar que o comportamento individual desses vazamentos possui um ponto em comum, por exemplo, a componente de valor máximo do *long range leakage* e as duas componentes máximas do *short range leakage* mostram que há uma inter-harmônica naquela região não múltipla da resolução. No caso do *long range leakage* a inter-harmônica está entre uma componente anterior (ou posterior) e a harmônica. Com isso, o ajuste da frequência passa inicialmente pela detecção do(s) valor(es) máximo(s) do vazamento espectral.

Conforme a Fig. 25, o ajuste realizado no 1º algoritmo proposto identifica a região de vazamento espectral e como se trata de um *long range leakage*, a posição do coeficiente máximo está estritamente próxima da frequência CC, fundamental ou harmônica.

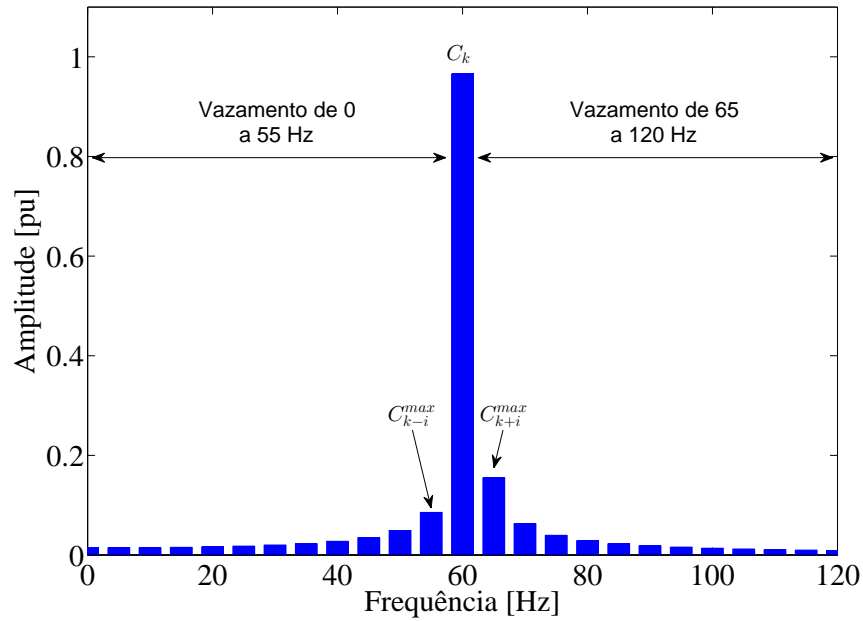


Figura 25 – Espectro com *long range leakage* e a identificação das componentes máximas para o 1º algoritmo.

Na Fig. 25 é mostrado os coeficientes máximos detectados no vazamento espectral do sinal avaliado. Após isso, nas posições detectadas são alocadas as componentes resultantes dos grupos inter-harmônicos do IEC 61000-4-7. Para os dois algoritmos propostos são aplicados subgrupo harmônicos e grupos inter-harmônicos, no caso da aplicação difere da norma ABNT NBR IEC 61000-4-30, onde se utiliza subgrupo inter-harmônico ao invés de grupo.

Assim como a figura anterior, a análise é feita na Fig. 26 para detecção das componentes máximas em um espectro com tipo *short range leakage*. Nesse caso, os coeficientes obtidos estão na mesmas região, ou seja, no vazamento entre 60 e 120 Hz. Ao verificar o resultado mostrado na Fig. 26, é possível observar que a inter-harmônica original está entre as frequências de 90 e 95 Hz, pois tratam-se das componentes máximas do vazamento e que possuem mais energia proveniente da inter-harmônica, que se espalhou ao longo das frequências múltiplas de 5 Hz.

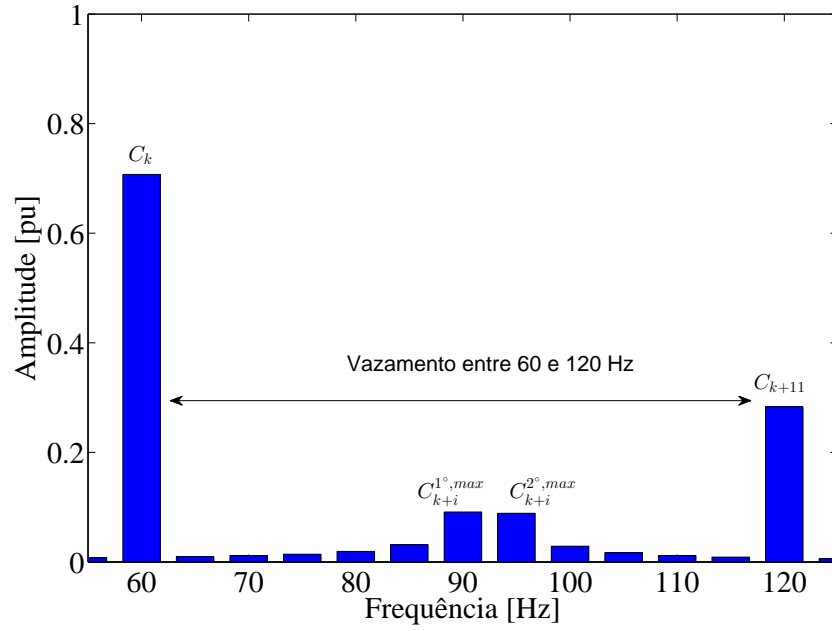


Figura 26 – Espectro com *short range leakage* e a identificação das componentes máximas para o 2º algoritmo.

Após a identificação das frequências que alocam as duas componentes máximas, o passo seguinte é a distribuição da energia, do agrupamento por meio do grupo inter-harmônico, entre essas frequências identificadas. A distribuição é feita a partir da ponderação das componentes, atribuindo o peso que cada componente tem relação a soma total das componentes máximas, conforme mostra as Eq. 3.14 e 3.15.

$$G_{ig,n}^{1^\circ} = G_{ig,n} \frac{C_{k+i}^{1^\circ, \text{máx}}}{C_{k+i}^{1^\circ, \text{máx}} + C_{k+i}^{2^\circ, \text{máx}}} \quad (3.14)$$

$$G_{ig,n}^{2^\circ} = G_{ig,n} \frac{C_{k+i}^{2^\circ, \text{máx}}}{C_{k+i}^{1^\circ, \text{máx}} + C_{k+i}^{2^\circ, \text{máx}}} \quad (3.15)$$

Onde, $G_{ig,n}^{1^\circ}$ e $G_{ig,n}^{2^\circ}$ representam o valor do agrupamento na primeira e segunda componente máxima, respectivamente. Os $C_{k+i}^{1^\circ, \text{máx}}$ e $C_{k+i}^{2^\circ, \text{máx}}$ representam a primeira e a segunda componente máxima, respectivamente.

Os valores ponderados do agrupamento são localizados nas frequências f_{k+i} , onde subscrito $k+i$ representa uma posição ao longo do espectro, sendo k uma posição fixa de referência e i o incremento de posição.

3.2.2.1 Proposta do 1º algoritmo

Na Fig. 29 é ilustrado o 1º algoritmo proposto por meio de um fluxograma. Para mais detalhes, o algoritmo está disponível no apêndice C.9.

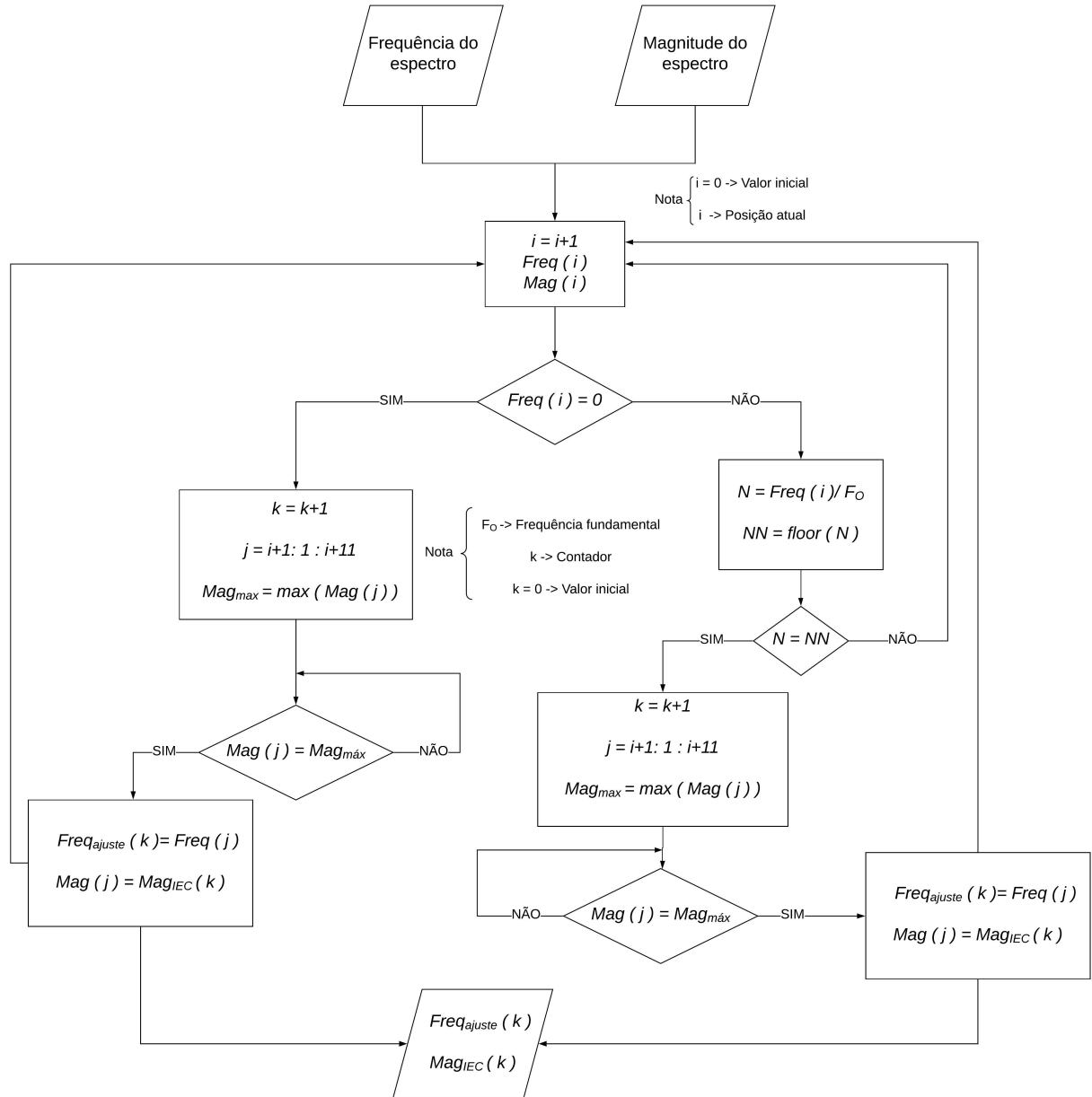


Figura 27 – Fluxograma do 1º algoritmo proposto de ajuste da frequência de agrupamento.

3.2.2.2 Proposta do 2º algoritmo

Na Fig. 28 é ilustrado o 2º algoritmo de proposto por meio de um fluxograma. Para mais detalhes, o algoritmo está disponível no apêndice C.10.

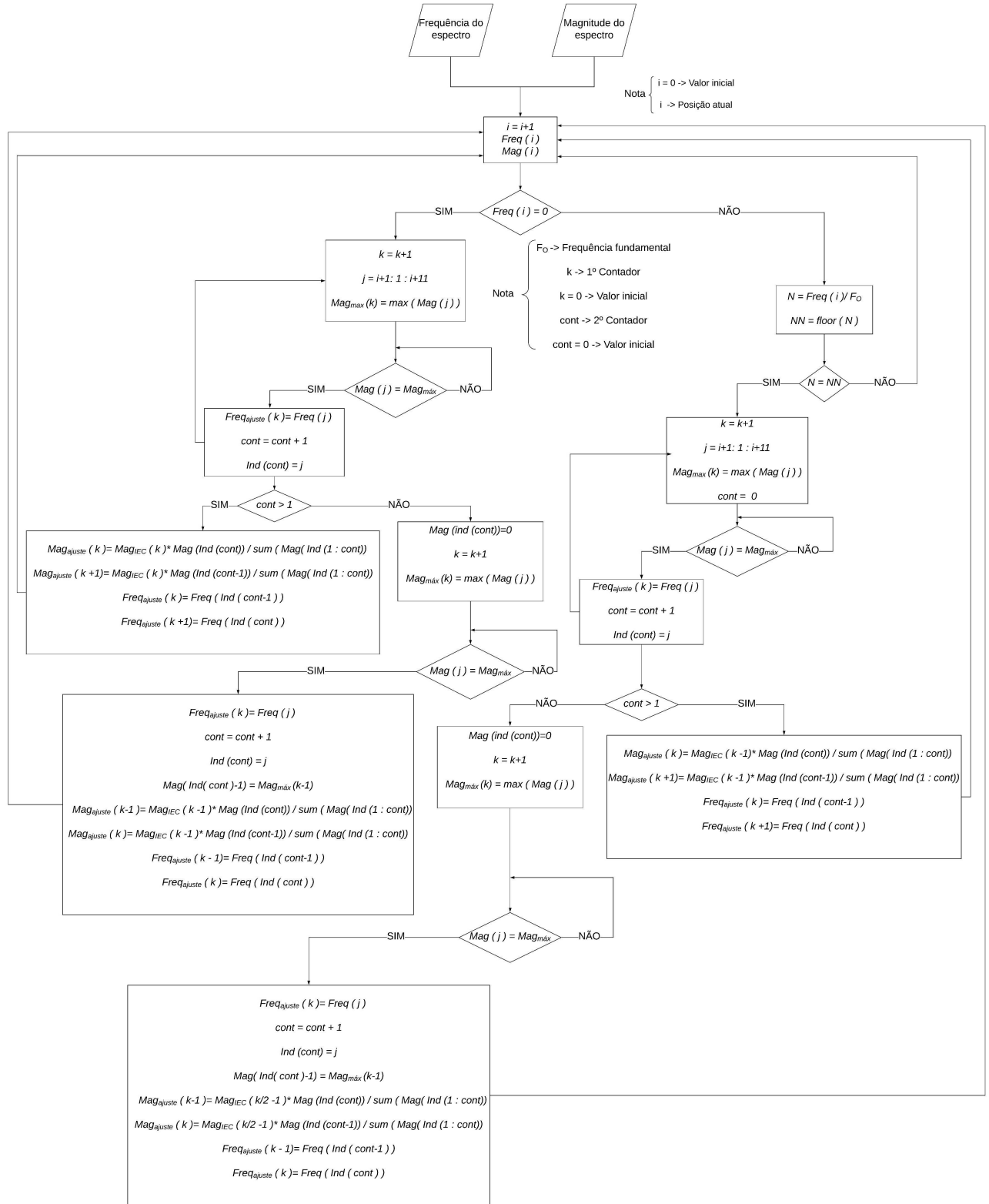


Figura 28 – Fluxograma do 2º algoritmo proposto de ajuste da frequência de agrupamento.

3.2.3 Métricas de desempenho qualitativo da reconstrução

A avaliação de uma métrica de desempenho para a reconstrução é uma etapa importante para caracterizar a qualidade de um sinal reconstruído. Esse tema é bem consolidado em estudos de compressão de sinais, pois o desempenho de uma reconstrução mostra, em partes, a qualidade de um processo de compressão. Além disso, as métricas são capazes de mostrar, para um sinal reconstruído, o quanto de informação original que foi perdido e o quanto de ruído ou distorção que foi inserido ([CORMANE, 2013](#)).

A primeira métrica de desempenho é o erro absoluto mostrado na Eq. 3.16, trata-se de uma métrica simples e direta pois calcula a diferença entre os sinais, o original e o reconstruído.

$$E = [x(t) - \hat{x}(t)] \quad (3.16)$$

Onde, E é O erro absoluto, $x(t)$ é o sinal genérico original e $\hat{x}(t)$ é o sinal reconstruído.

A segunda métrica de desempenho é a relação sinal-ruído (SNR) calculado pela Eq. 3.17, a partir de uma relação do sinal original com a distorção.

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{t=0}^{T_w} x(t)^2}{\sum_{t=0}^{T_w} [x(t) - \hat{x}(t)]^2} \right] \quad [\text{dB}] \quad (3.17)$$

A métrica compara a energia do sinal original com a energia da distorção. A interpretação é que quanto maior o valor do SNR, menor é a distorção causada pela reconstrução usando os métodos de agrupamento. Por outro lado, valores próximos de zero indica que o sinal reconstruído não representa devidamente o conteúdo do sinal original. O SNR é uma métrica comumente usada avaliar compressão de sinais elétricos de sistemas potência, nesse sentido, os sinais construídos neste trabalho possuem as dinâmicas dos sinais elétricos e, por isso, optou-se por utilizar essa métrica para avaliar a reconstrução dos mesmos.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo é apresentado os resultados das simulações dos métodos IEC e o Chang aplicados aos sinais sintéticos de tensão e corrente realizadas no *software* MATLAB[®] versão 8.0.0 (R2012b). É realizada a comparação entres os resultados dos indicadores THD, TID e a energia dos métodos com os valores teóricos originais dos sinais.

Os sinais são reconstruídos com os métodos IEC e Chang que, por sua vez, são comparados aos resultados dos algoritmos propostos por meio das métricas de desempenho, sendo a discrepância e o SNR.

Após isso, o teste de sensibilidade à amplitude e frequência foi aplicados aos métodos e, novamente, os indicadores são comparados com os valores originais. Para o método IEC, conforme já mencionado na seção 3.1.1, será apresentado os resultados dos subgrupos harmônicos e subgrupos inter-harmônicos e para o cálculo do THD e TID serão calculados os THDS e o TIDS, respectivamente, conforme retrata a norma ABNT NBR IEC 61000-4-30 (ABNT, 2011). Para os resultados das demais configurações do método IEC serão apresentados nos apêndices A.

4.1 Sinais sintéticos

Os sinais sintéticos são criados para avaliação dos métodos que serão simulados a partir desses sinais. Desta forma, os sinais são senoides puras com harmônicas e inter-harmônicas como sendo uma fonte de representação teórica dos sinais reais de tensão e corrente. O sinal genérico é descrito a seguir na Eq. 4.1.

$$x(t) = \sum_{n_h=1}^{n_{h_{máx}}} A(n_h f_o) \sin(2\pi f_o n_h t + \phi_h) + \sum_{f_{ih}}^{f_{ih_{máx}}} A(f_{ih}) \sin(2\pi f_{ih} t + \phi_{ih}) + \epsilon(t) \quad (4.1)$$

Onde, $A(n_h f_o)$ e $A(f_{ih})$ são as amplitudes harmônicas e inter-harmônicas, respectivamente. O n_h é ordem harmônica, f_o é frequência fundamental e f_{ih} é a frequência inter-harmônica. O ϕ_h e ϕ_{ih} são as fases harmônicas e inter-harmônicas. Além disso, é adicionado o $\epsilon(t)$ que é o ruído gaussiano branco de média zero e está representando um ruído de medição.

Os sinais são discretos cuja a taxa de amostragem utilizada é de 256 amostras/ciclo da frequência fundamental de 60 Hz e, semelhante aos exemplos vistos na seção 2.2.2, os sinais possuem $f_S = 15360$ Hz, $N_w = 3072$ amostras e $\Delta f = 5$ Hz. Portanto, da Eq. 4.1 com $t = n T_S$, o sinal é discretizado para um período T_S e o n é inteiro ($0, 1, 2, \dots, N_w - 1$). O ruído de medição apresenta uma relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise*

Ratio) de 35 dB conforme proposto por Oliveira (2015) e aproxima das configurações dos medidores/analísadores de energia.

São definidos 4 sinais:

- Sinal sintético de tensão com harmônicas (Tab. 1);

Tabela 1 – Valores de frequência e amplitude de tensão por unidade (pu) com harmônicas.

n_h	Frequências harmônicas [Hz]	$A(n_h f_o)$ [pu]	ϕ_h [°]
1	60	1	0
3	180	0,07	15
5	300	0,06	2
7	420	0,03	88,8
9	540	0,0245	-168

- Sinal sintético de tensão com harmônicas e inter-harmônicas (Tab. 2).

Tabela 2 – Valores de frequência e amplitude de tensão em pu com harmônicas e inter-harmônicas.

n_h	Frequências harmônicas [Hz]	$A(n_h f_o)$ [pu]	ϕ_h [°]
1	60	1	0
3	180	0,07	15
5	300	0,06	2
7	420	0,03	88,8
9	540	0,0245	-168

(a) Harmônicas

f_{ih} [Hz]	$A(f_{ih})$ [pu]	ϕ_{ih} [°]
91	0,002	-35
152,2	0,002	12
213,5	0,002	-75
274	0,002	105
305	0,002	0
411	0,002	57

(b) Inter-harmônicas

- Sinal sintético de corrente com harmônicas (Tab. 3);

Tabela 3 – Valores de frequência e amplitude de corrente em pu com harmônicas.

n_h	Frequências harmônica [Hz]	$A(n_h f_o)$ [pu]	ϕ_h [°]
1	60	1	0
2	120	0,7	170
3	180	0,5	45
4	240	0,3	95
5	300	0,1	100
6	360	0,1	0
7	420	0,05	-120

- Sinal sintético de corrente com harmônicas e inter-harmônicas (Tab. 4);

Tabela 4 – Valores de frequência e amplitude de corrente em pu com harmônicas e inter-harmônicas.

n_h	Frequências harmônicas [Hz]	$A(n_h f_o)$ [pu]	ϕ_h [°]
1	60	1	0
2	120	0,7	170
3	180	0,5	45
4	240	0,3	95
5	300	0,1	100
6	360	0,1	0
7	420	0,05	-120

(a) Harmônicas

f_{ih} [Hz]	$A(f_{ih})$ [pu]	ϕ_{ih} [°]
91	0,2	-40
152,2	0,2	5
213,5	0,2	-105
274	0,2	90
305	0,2	10
411	0,2	180

(b) Inter-harmônicas

Os sinais sintéticos de tensão foram criados seguindo as recomendações do Módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017), onde os valores de tensão não devem gerar distorções harmônicas totais acima de 10% da componente fundamental. Os valores das inter-harmônicas foram baseados nas recomendações da IEC que limita os valores de tensão para 0,2% da tensão fundamental (HANZELKA; BIEN, 2004). Nos sinais sintéticos de corrente não houve um embasamento em normas para os valores das harmônicas e inter-harmônicas, utilizou-se valores baseados nos trabalhos de Monteiro (2014) e Bonfim (2017) para a construção dos sinais de corrente.

4.2 Aplicação dos métodos IEC e Chang em sinais sintéticos de tensão e corrente

4.2.1 Sinal de tensão e corrente com harmônicas

Os sinais foram apresentados na seção 4.1, mais especificamente, nas Tab. 1 e 2, respectivamente, e são representações sintéticas do sinal de tensão e corrente, para a aplicação dos métodos IEC e o Chang os resultados dos indicadores são mostrados a seguir pelas Tab. 5 e 6.

Tabela 5 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de tensão com harmônicas.

THD [%]			TID [%]		Energia		
Original	IEC	Chang	Original	IEC	Original	IEC	Chang
10,00	10,00	10,02	0	0,60	0,7110	0,7108	0,7108

Tabela 6 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de corrente com harmônicas.

THD [%]			TID [%]		Energia		
Original	IEC	Chang	Original	IEC	Original	IEC	Chang
92,33	92,33	92,33	0	0,51	0,9629	0,9627	0,9627

É possível destacar que houve pequenas variação entre os resultados dos métodos e o original nas Tab. 5 e 6 devido ao erro medição inserido, por outro lado, conforme esperado para o sinal que contém apenas harmônicas os resultados são aproximadamente iguais para quaisquer métodos. Por não haver inter-harmônicas que geram efeitos de vazamento espectral, a energia é contida apenas nos harmônicos e o que facilita a exatidão nos resultados dos métodos de agrupamento.

4.2.2 Sinal de tensão e corrente com harmônicas e inter-harmônicas

Para os sinais de tensão e corrente com harmônica e inter-harmônica que foram apresentados nas Tab. 3 e 4 (seção 4.1), foram obtidos os seguintes resultados mostrados a seguir pelas Tab. 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de tensão com harmônicas e inter-harmônicas.

THD [%]			TID [%]		Energia		
Original	IEC	Chang	Original	IEC	Original	IEC	Chang
10,00	10,00	10,03	0,49	0,72	0,7108	0,7106	0,7106

A partir dos resultados destacados nas Tab. 7 e 8, nota-se variações entres os valores dos métodos IEC e Chang com o original. Principalmente na Tab. 8, onde o sinal

Tabela 8 – Resultados dos indicadores para o sinal sintético de corrente com harmônicas e inter-harmônicas.

THD [%]			TID [%]		Energia		
Original	IEC	Chang	Original	IEC	Original	IEC	Chang
92,33	93,96	103,57	48,99	43,91	1,0241	1,0240	1,0240

possui maiores amplitudes de inter-harmônicas, por consequência, o vazamento espectral influenciará ainda mais nas componentes harmônicas, o que resulta em diferentes valores nos indicadores. Além disso, percebe-se uma pequena variação nos valores de energia nas Tab. 8 e 7, as pequenas divergências podem ter sido causadas pelos erros de medições inseridos, pois possuem característica aleatória para cada teste realizado.

Para os resultados dos THD e TID que apresentaram variações maiores quando comparados com valores originais, como mostrado nas Tab. 8 e tab. 7, a explicação está relacionada à presença de componentes inter-harmônicas que, dependendo da posição no espectro, podem inserir erros na quantificação pelos métodos devido às características do vazamento espectral.

4.3 Avaliação do teste de sensibilidade à amplitude e frequência dos métodos IEC e Chang

Ao detectar o problema do vazamento espectral causado pelas inter-harmônicas de frequências não múltiplas da resolução e os reflexos nos resultados dos métodos de agrupamento apresentados na seção 4.2, o teste de sensibilidade a variação de amplitude e frequência surge como alternativa de avaliar a relação das amplitude e frequências inter-harmônicas com os erros nos THD, TID e energia apresentados pelos métodos IEC e Chang.

O teste é iniciado com um sinal com apenas harmônicas, sem adição de ruído de medição e no decorrer do teste é incrementado uma inter-harmônica que varia a posição em frequência para cada variação em amplitude. Os valores do sinal são mostrados na Tab. 9.

Tabela 9 – Valores de frequência e amplitude por unidade (pu) com harmônicas do sinal de teste.

n_h	Frequências harmônicas [Hz]	$A(n_h f_o)$ [pu]	ϕ_h [°]
1	60	1	0
3	180	0,08	0
5	300	0,06	0

4.3.1 Resultados para o THD

O sinal do teste descrito na Tab. 9 possui um THD de 10%. O valor será a referência do THD original, na qual os resultados obtidos pelos métodos foram comparados com esse valor. A Figura 29 mostra que a invariância do THD original ao longo do teste de sensibilidade, isto é, durante o teste não houve modificações nas harmônicas, apenas a inclusão da inter-harmônica. Portanto, o valor “ideal” de THD é de 10 % independente do valor de amplitude e frequência inter-harmônica.

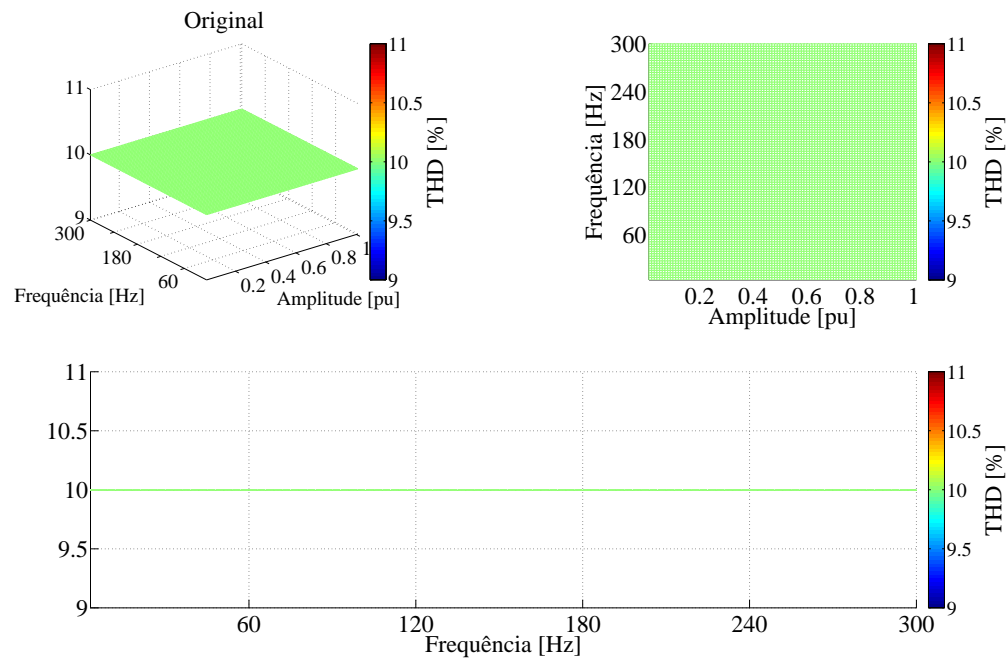


Figura 29 – Valor do THD original ao longo do teste de sensibilidade.

Os resultados para o método IEC 61000-4-7 são apresentados na Fig. 30 e a respectiva discrepância na Fig. 31. Tratando-se de um teste a qual há variação tanto em frequência quanto em amplitude, os resultados foram mostrados em forma de gráfico em superfície 3D com as vistas superior e lateral esquerda.

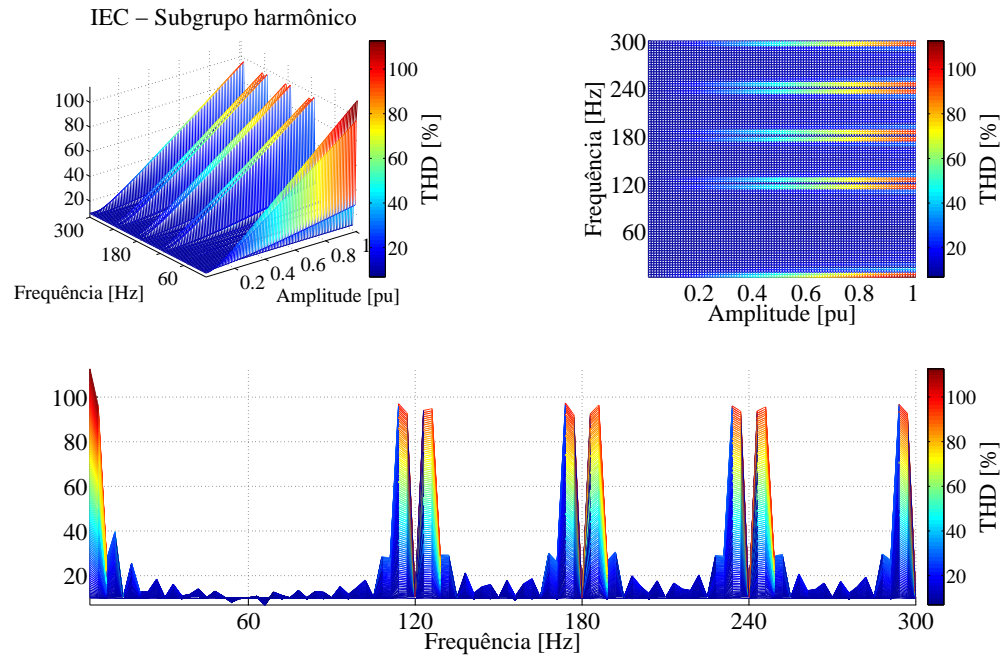


Figura 30 – Resultados dos THD do método IEC - Subgrupo harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

Ao avaliar a Fig. 30, é possível destacar que os maiores valores de THD estão próximos à componente CC (0 Hz) e às harmônicas. Além disso, a presença de amplitudes com valores acima de 0,2 pu elevam os resultados do THD para acima de 20%, consequentemente, elevando as discrepâncias conforme a Fig. 31. A explicação por trás desses resultados está relacionado a forte influência do vazamento espectral, especificamente, do tipo *long range leakage* causado pela inter-harmônicas próximas à CC e às harmônicas. Por consequência, os valores calculados pelos subgrupos harmônicos (IEC 61000-4-7) são muito diferentes nessa situação, o que faz gerar altos valores de THD. O perfil do resultado para região próxima à fundamental é diferente, ocorre que a presença de inter-harmônica na região aumenta o valor da amplitude fundamental calculada pelo agrupamento IEC. O que significa que com amplitude da fundamental elevada e sabendo que as harmônicas permanecem com seus valores próximos aos originais, o resultado é a diminuição no THD, conforme a Eq. 3.11 que é a aplicação do THD com subgrupo harmônico. É possível também observar um afundamento dos valores do THD nas regiões entre as harmônicas, isso ocorre porque nessas regiões as inter-harmônicas e, se houver, os vazamentos espectrais são agrupados pelos subgrupos inter-harmônicos que não fazem parte da quantificação das harmônicas e não fazem parte do cálculo do THD. Logo, os valores dos THD nessas regiões foram por volta de 10 a 20%, valores próximos ao valor original de referência.

A Figura 31 ilustra as discrepâncias entre os resultados obtidos pelo agrupamento IEC e o valor original. Desta forma, o perfil é praticamente igual à Fig. 30, a diferença é apenas um deslocamento de 10 % dos resultados do agrupamento IEC, causado pelo valor original que possui o mesmo valor do deslocamento.

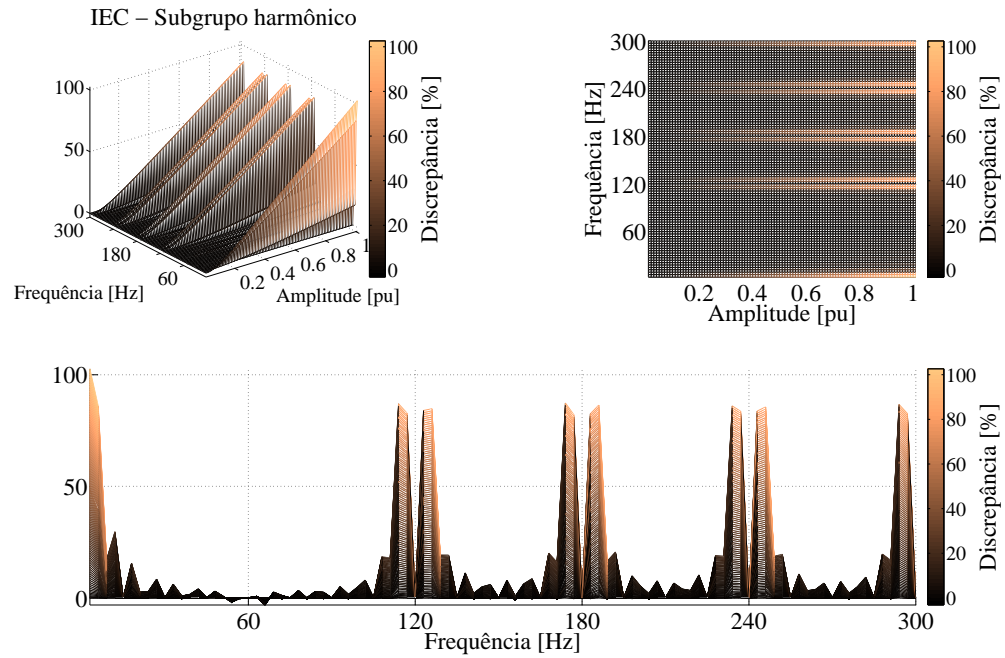


Figura 31 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo harmônico (Fig. 30) e o valor do THD original (Fig. 29).

Os resultados para o método Chang são mostrados na Fig. 32 e as discrepâncias na Fig. 33.

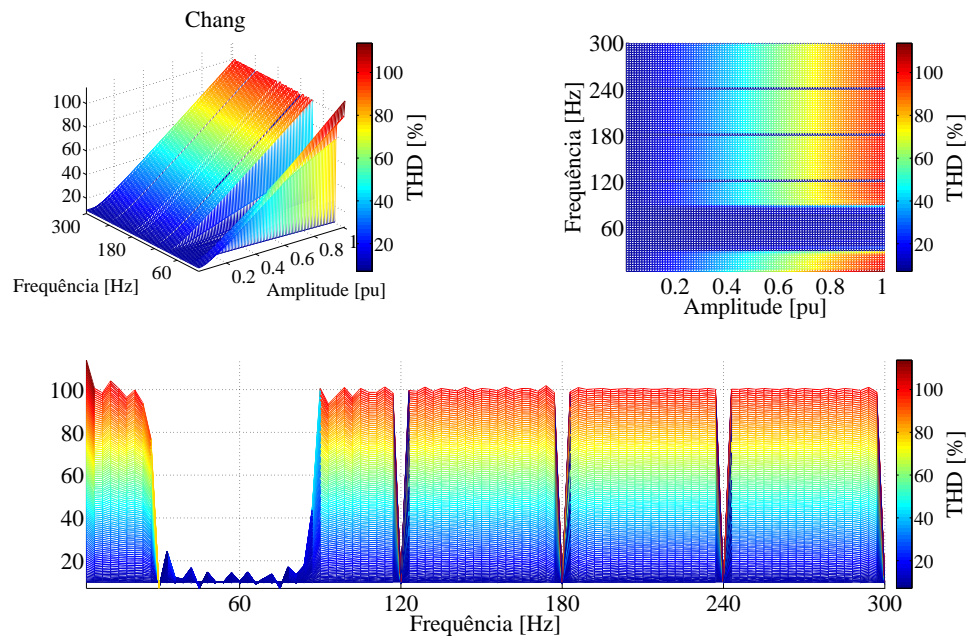


Figura 32 – Resultados dos THD do método Chang ao longo do teste de sensibilidade.

Nota-se na Fig. 32 que os resultados possuem uma semelhança com os resultados do método IEC para a componente CC e as harmônicas. Por outro lado, na região entre as harmônicas o padrão crescente do THD é mantido, isso é devido o aumento da amplitude que ocorre para cada posição em frequência.

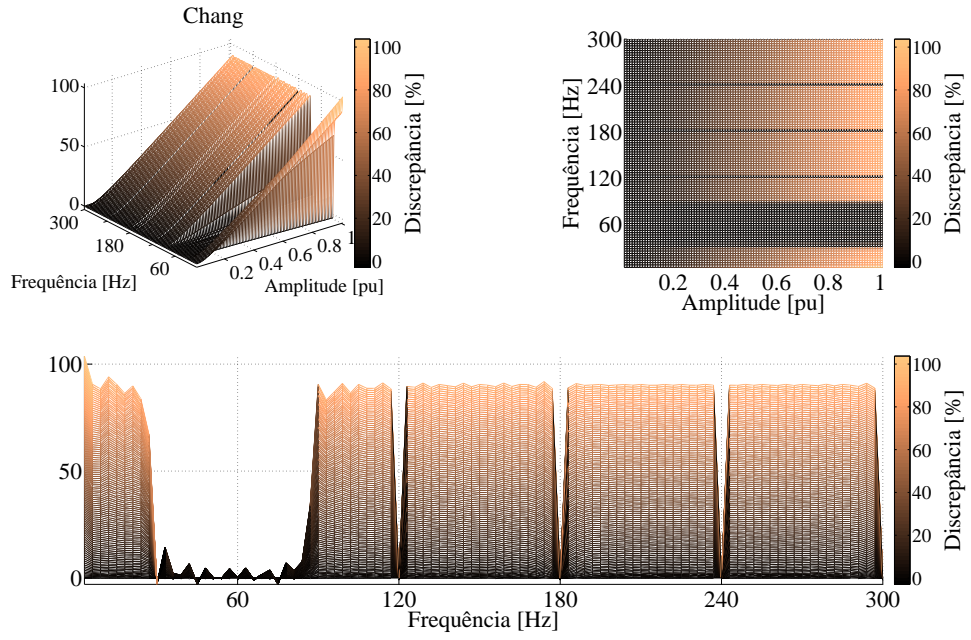


Figura 33 – Discrepâncias entre os resultados do Chang (Fig. 32) e o valor do THD original (Fig. 29).

Na região próxima à fundamental os valores de THD são baixos e próximos ao original, assim como o IEC a justificativa está no aumento da amplitude da fundamental com aplicação do agrupamento Chang. Além disso, na Fig. 32 os resultados entre as frequências harmônicas possuem padrão crescente de THD a medida que a amplitude aumenta, o padrão é recorrente em toda essa região e, ao observar o método Chang (Fig. 16), nota-se que os limites dos agrupamentos abrangem as metades das regiões entre as harmônicas. Nesse sentido, esse padrão crescente se repete conforme observado para as frequências de 120 a 180 Hz, 180 a 240 Hz e 240 a 300 Hz, onde há vazamentos de curto e longo alcance (*short range leakage* e *long range leakage*). Portanto, a maior sensibilidade do método Chang está nas regiões entre as harmônicas e próximos à componente CC, sendo as inter-harmônicas com amplitudes acima de 0,1 pu.

Assim como na Fig. 31, a Fig. 33 ilustra as discrepâncias entre os resultados obtidos pelo agrupamento Chang e o valor original. E novamente, o perfil é semelhante à Fig. 32, com a diferença de um deslocamento de 10 % dos resultados do agrupamento Chang.

4.3.2 Resultados para o TID

O sinal da Tab. 9 possui os valores originais do TID que mostram um perfil crescente conforme a amplitude aumenta para cada posição de frequência, semelhante ao resultado apresentado na Fig. 32. Analisando o perfil em 3D da Fig. 34, percebe-se que a forma é um plano inclinado e é notório pela vista superior que os valores dos TID são ditados pelos valores das amplitudes, independentemente da variação em frequência.

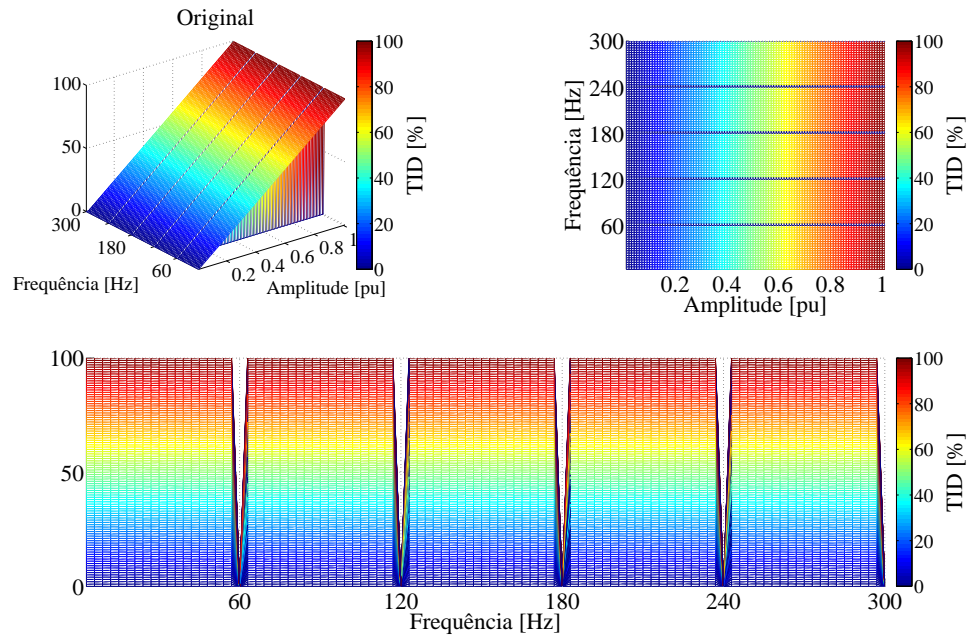


Figura 34 – Valores dos TID original ao longo do teste de sensibilidade.

Os resultados para o método IEC - subgrupo inter-harmônico são mostrados na Fig. 35 e as discrepâncias na Fig. 36.

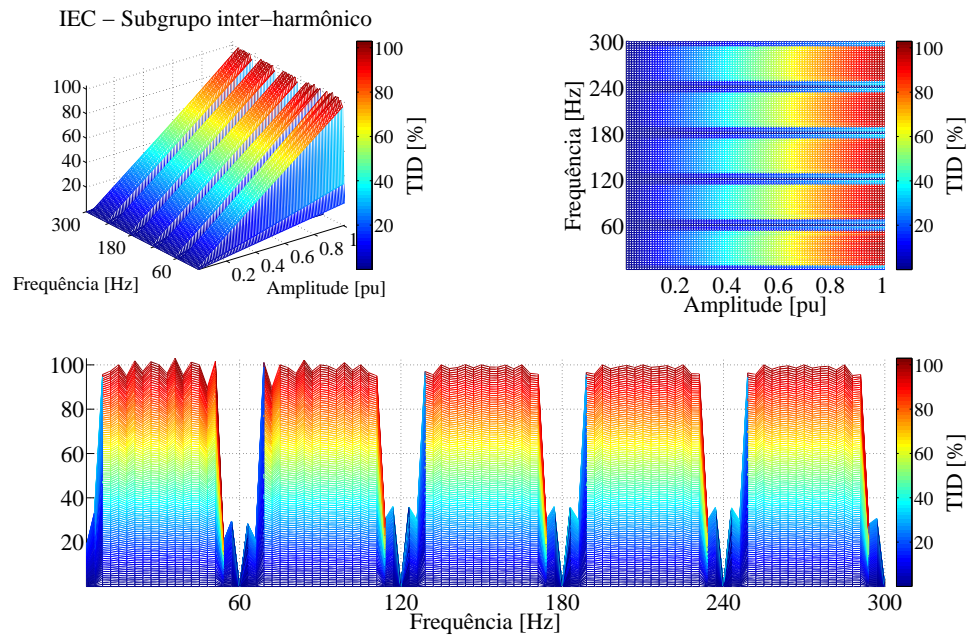


Figura 35 – Resultados dos TID do método IEC - Subgrupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

Pela análise da Fig. 35 é possível observar que os valores próximos à componente CC, à fundamental e às harmônicas são reduzidos, pelo fato da proximidade da inter-harmônica com as mesmas. O que implica em vazamentos do tipo longo alcance que espalham grande parte da energia para as regiões do subgrupos harmônicos e reduz em

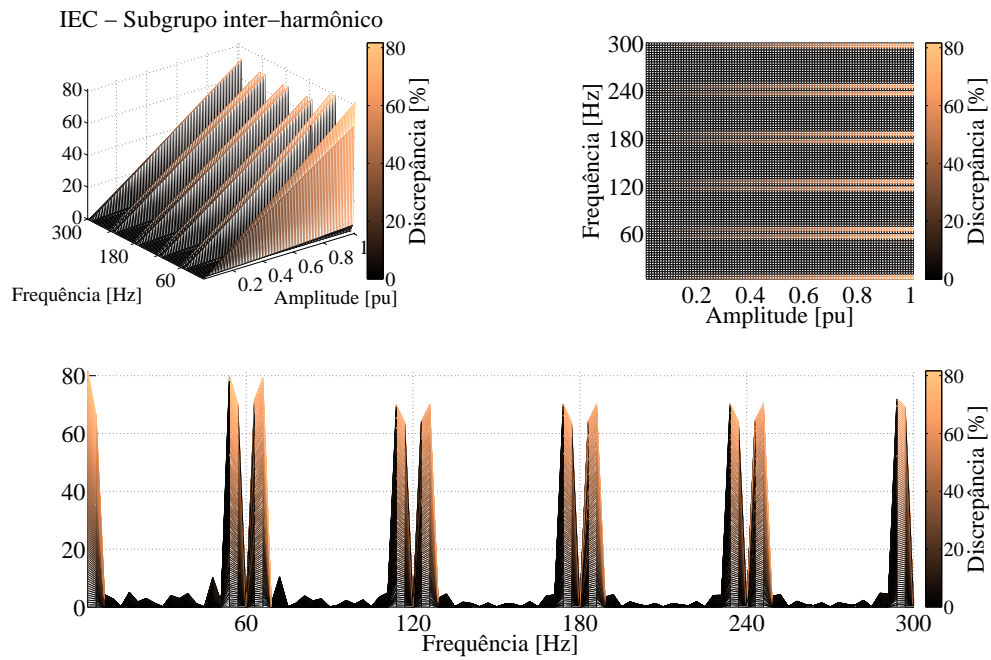


Figura 36 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo inter-harmônico (Fig. 35) e os valores dos TID originais (Fig. 34).

parcelas a energia para o subgrupo inter-harmônico. Logo, com valores menores de subgrupo inter-harmônico, menores são os TID o que explica os valores reduzidos nas regiões em questão. Portanto, para o TID o método IEC é mais sensível nas regiões apresentadas e para quaisquer valores de amplitude, como ilustrado na Fig. 35.

Nota-se nas discrepâncias apresentadas na Fig. 36 que os maiores valores de erro estão nas regiões mais sensíveis definidas anteriormente. Na demais regiões, as discrepâncias se mostraram abaixo dos 10%. Destaca-se, portanto, que essas regiões de menores discrepâncias são menos sensíveis as variações e mais próximos aos valores originais.

4.3.3 Resultados para a Energia do Espectro

A energia do espectro é calculada pela Eq. 3.13 que o lado direito da expressão do teorema de Parseval, isso significa que a energia avaliada está no domínio transformado de Fourier (frequência). Os valores originais da energia para o sinal do teste são apresentados na Fig. 37.

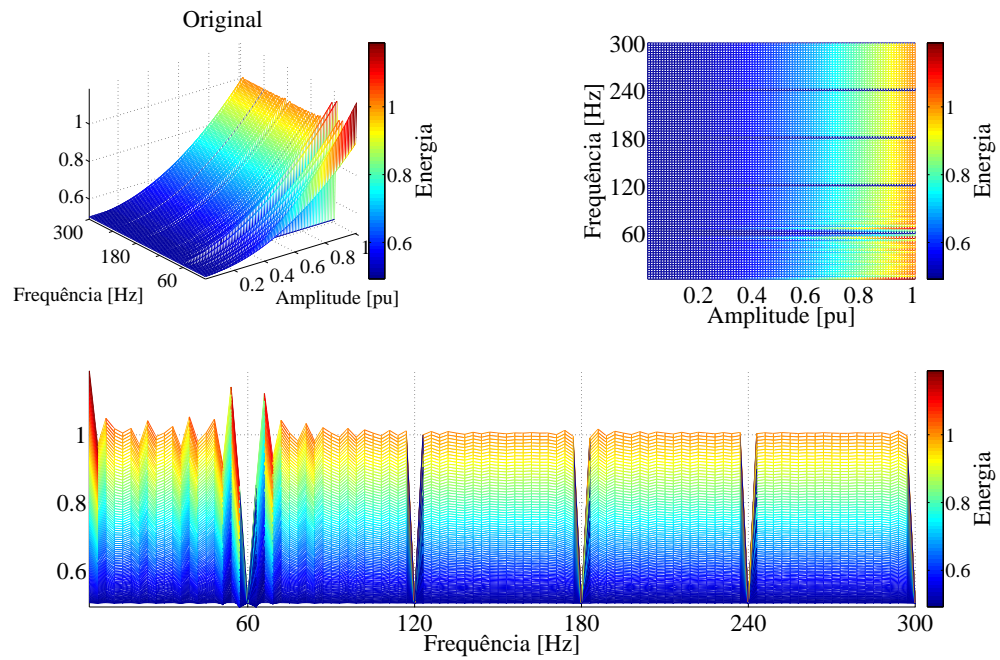


Figura 37 – Valores das energias dos espectros originais ao longo do teste de sensibilidade.

Ao avaliar as energias originais, as regiões entre a componente CC, a fundamental e a 2ª harmônica (120 Hz) possuem oscilações de energia entorno do valor unitário de energia. As oscilações ocorrem com as amplitudes acima de 0,8 pu. Os resultados das energias para o método IEC - Subgrupo inter-harmônico são mostrados na Fig. 38 e as discrepâncias na Fig. 39

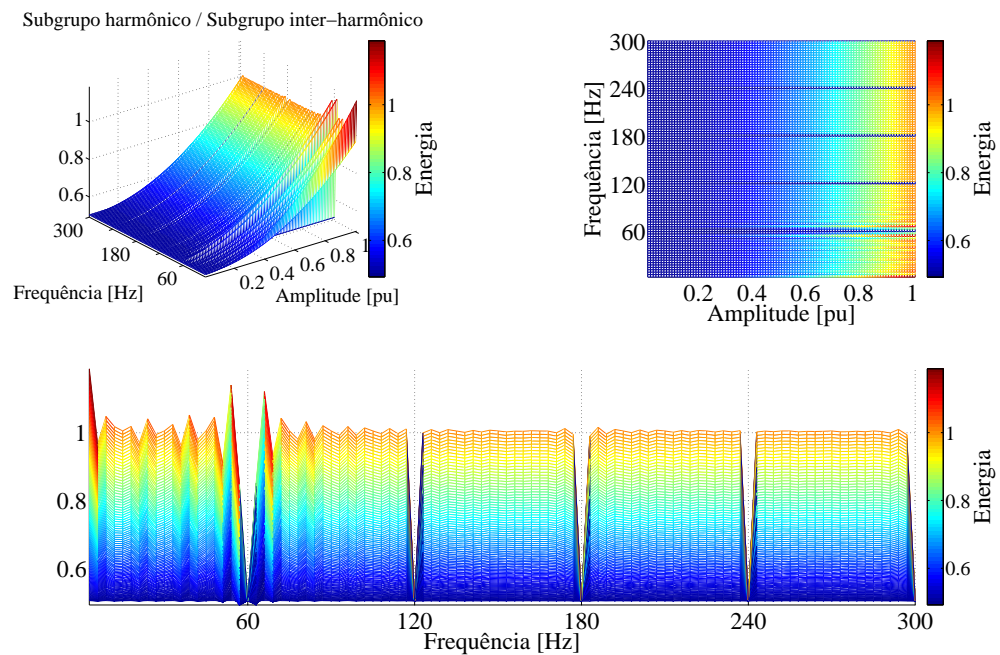


Figura 38 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Subgrupo harmônico / inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

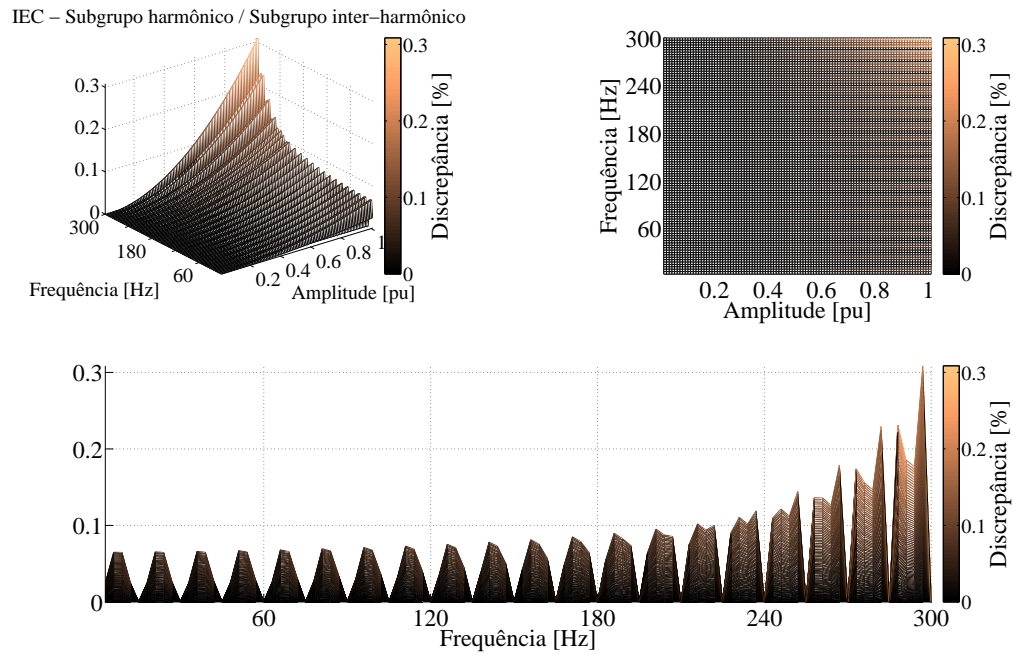


Figura 39 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo harmônico / inter-harmônico (Fig. 38) e o valores das energias originais (Fig. 37).

De porte da Fig. 38, visualmente os resultados não apresentam diferenças nítidas em relação aos valores originais da Fig. 37.

Acerca das discrepâncias ilustradas na Fig. 39, é possível observar as regiões com maiores propagações de erros, o que não seria possível observando apenas as Fig. 38 e 37. As discrepâncias são mínimas para todo o teste, contribuindo apenas com valor máximo de discrepância de 0,3 %. Tomando a vista lateral esquerda (Discrepância [%] x Frequência [Hz]) da superfície em 3D, o perfil apresentado é “dentado” e a medida que se aproxima das últimas harmônicas (entre 240 e 300 Hz) os valores se elevam. O perfil “dentado” é causado quando o valor de discrepância vai para zero, isso é notado ao longo do espectro e justamente nas frequências múltiplas de 15 Hz que é múltiplo de 3 e 5 Hz, simultaneamente. Portanto, sendo os 15 Hz múltiplo da resolução do espectral, não há vazamentos espectrais. Desta forma, o espectro agrupado se torna o espectro original e as discrepâncias são, conseqüentemente, nulas. Além disso, o aumento da discrepância quando se aproxima das últimas frequências está relacionado com o limite da aplicação do método IEC, ou seja, neste trabalho foram aplicados os subgrupos até a primeira harmônica depois da última presente no sinal, deixando de contabilizar as componentes seguintes (maiores do que 360 Hz). As componentes posteriores não contabilizadas introduzem uma discrepância nos resultados das energias dos espectros em comparação aos valores originais, principalmente quando as inter-harmônicas com amplitudes elevadas e com *long range leakage* estão próximas à última harmônica.

A seguir, os resultados da energia do espectro para o método Chang são mostrados

pela Fig. 40 e as discrepância pela Fig. 41.

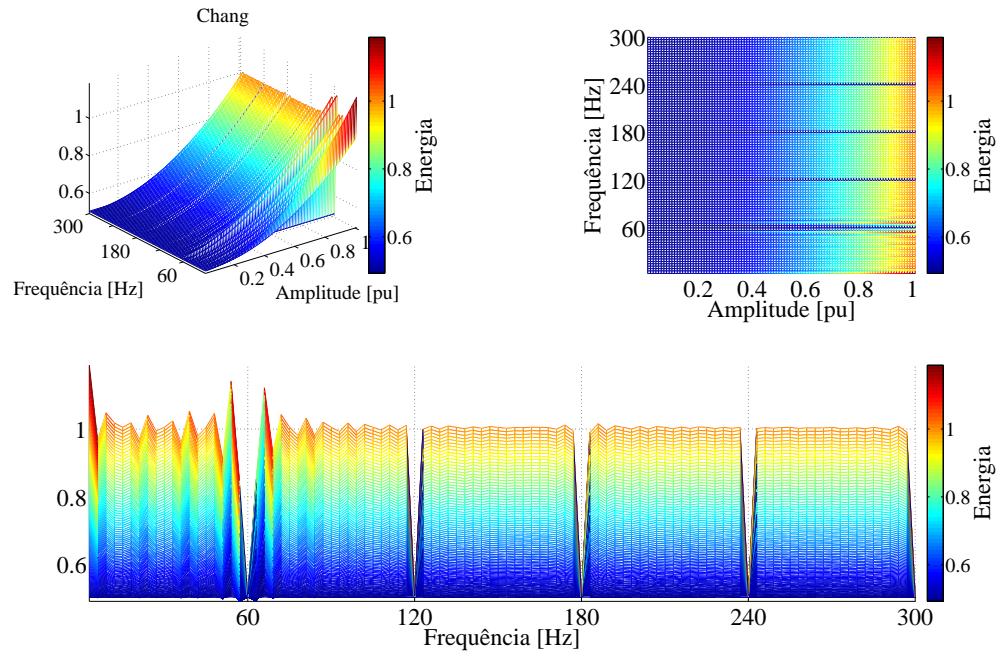


Figura 40 – Resultados das energias dos espectros do método Chang ao longo do teste de sensibilidade.

Na Figura 40 retrata os resultados semelhantes aos apresentados pelo método IEC (Fig. 38) e uma comparação visual com os valores originais não mostra diferenças nítidas.

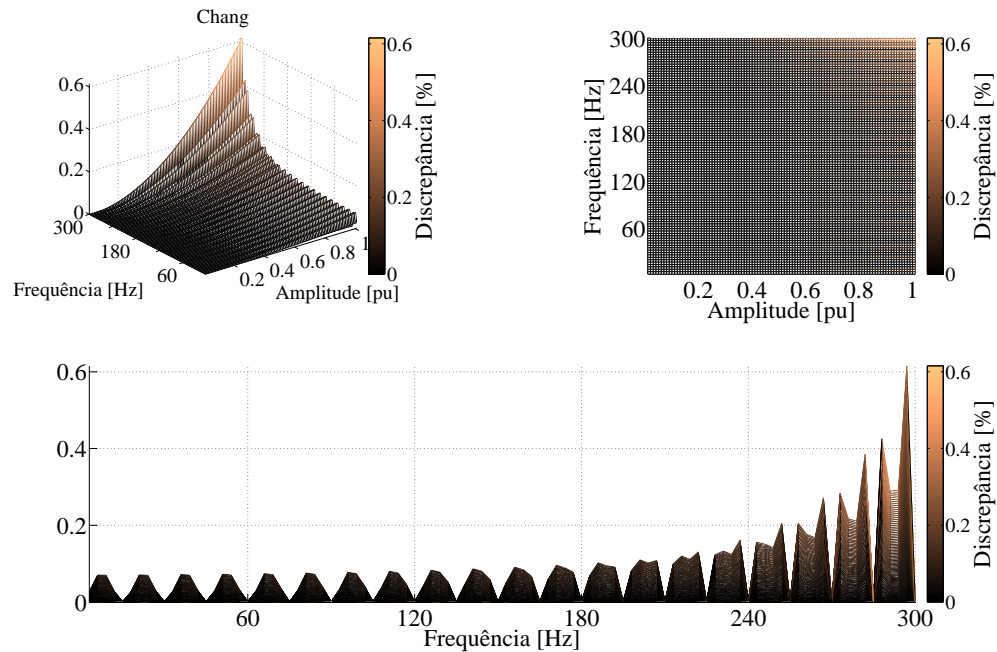


Figura 41 – Discrepâncias entre os resultados do método Chang (Fig. 40) e o valores das energias originais (Fig. 37).

Ao analisar as discrepâncias do agrupamento Chang, o perfil apresentado é análogo ao método IEC ilustrado pela Fig. 39. Assim como discutido para o método IEC,

para o método Chang os esclarecimentos são os mesmos. Destaca-se o valor máximo da discrepância por volta de 0,6 %, isto é, cerca de duas vezes maior do valor avaliado no método IEC. A disparidade nos valores máximos se dá pela diferenças entre os limites de agrupamento, conforme mostrado na Fig. 16 na seção 3.1.2, a forma de agrupamento Chang atinge em torno de 30 Hz a mais após a última harmônica, no teste em questão o limite é de 330 Hz e quando comparado com limite do método IEC esse valor é inferior, por consequência, a discrepância será superior. Ao desprezar as demais componentes um erro da energia do espectro é destacado e conforme mencionado, o valor do erro aumenta para a última harmônica do sinal e para amplitudes elevadas.

Os demais resultados de THD, TID e energia do espectro obtidos no teste para outras configurações do método IEC estão presentes no apêndice A.

4.4 Avaliação dos resultados da reconstrução dos sinais sintéticos

Os sinais que foram reconstruídos são os sinais sintéticos com inter-harmônicas descritos nas Tab. 2 e 4. No sinal da Tab. 2, onde para efeito de avaliação dos resultados foram alteradas as amplitudes inter-harmônicas, deixando-as de ser 0,2% da fundamental e passando para 2%. Para a Tab. 4 os valores das amplitudes deixaram de ser 20 % e passaram para 2% da fundamental. Os resultados em figuras desses sinais serão apresentados nesta seção. No apêndice B são mostrado os resultados para o sinal da Tab. 4 e para um sinal não estacionário, o objetivo é comparar os valores obtidos entre os métodos e as propostas. Para os demais sinais sintéticos (Tab. 1 e 3), não há variações significativas entre os métodos, portanto, não foram apresentados nos resultados deste trabalho.

4.4.1 Reconstrução proposta com o agrupamento IEC e o Chang com as fases predominantes

Os resultados para os sinais descritos anteriormente e reconstruído após aplicação do método IEC são mostrados pelas Fig. 42 e 43, respectivamente para o sinal de tensão e corrente.

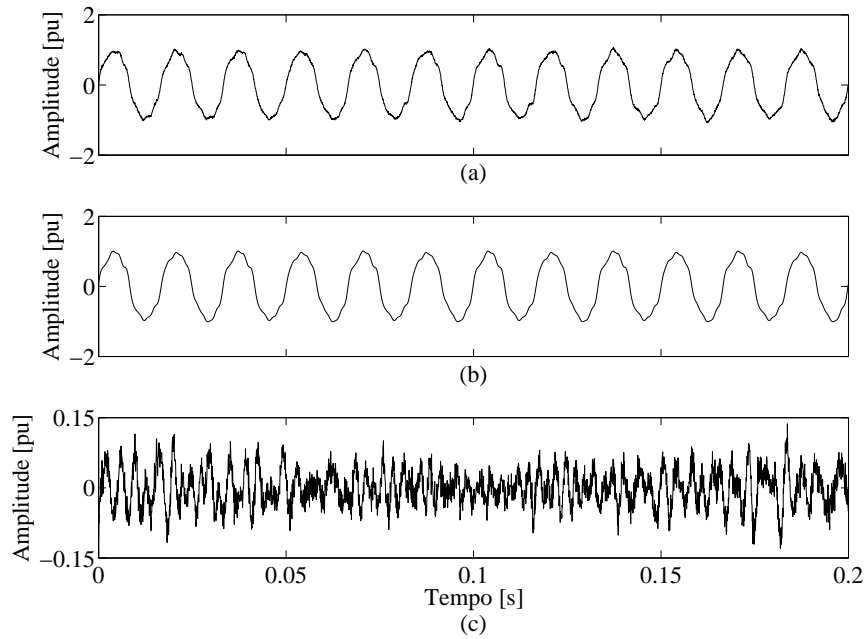


Figura 42 – Resultados do sinal de tensão com método IEC com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Ao observar o resultado para o sinal de tensão, o erro absoluto da reconstrução está contido em valores de -0,15 a 0,15 pu conforme mostrado na Fig. 42(c). O sinal reconstruído (Fig. 42(b)) se mostra mais limpo, não há ruído de medição, isto é, a energia das componentes presente do ruído está agrupada com as demais componentes do sinal e representadas por algumas componentes equivalentes. No caso do método IEC as componentes equivalentes são os subgrupos harmônicos e inter-harmônicos.

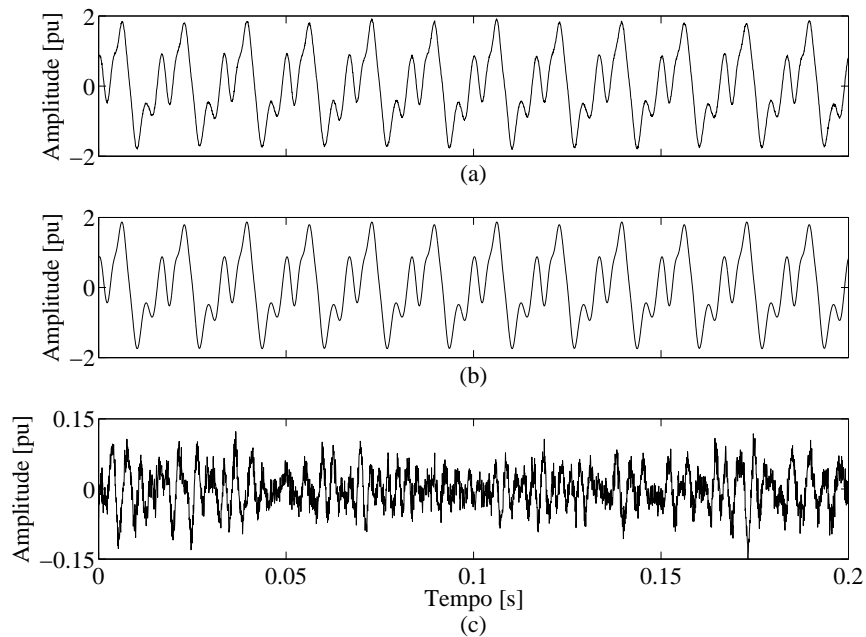


Figura 43 – Resultados do sinal de corrente com método IEC fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Para o sinal de corrente, os resultados do erro se situaram na faixa de -0,15 a 0,15 pu. Coincidentemente, os sinais das Fig. 42(a) e 43(a) possuem inter-harmônicas de 2% de amplitude da fundamental.

Os resultados para os sinais reconstruídos após aplicação do método Chang são mostrados pelas Fig. 44 e 45

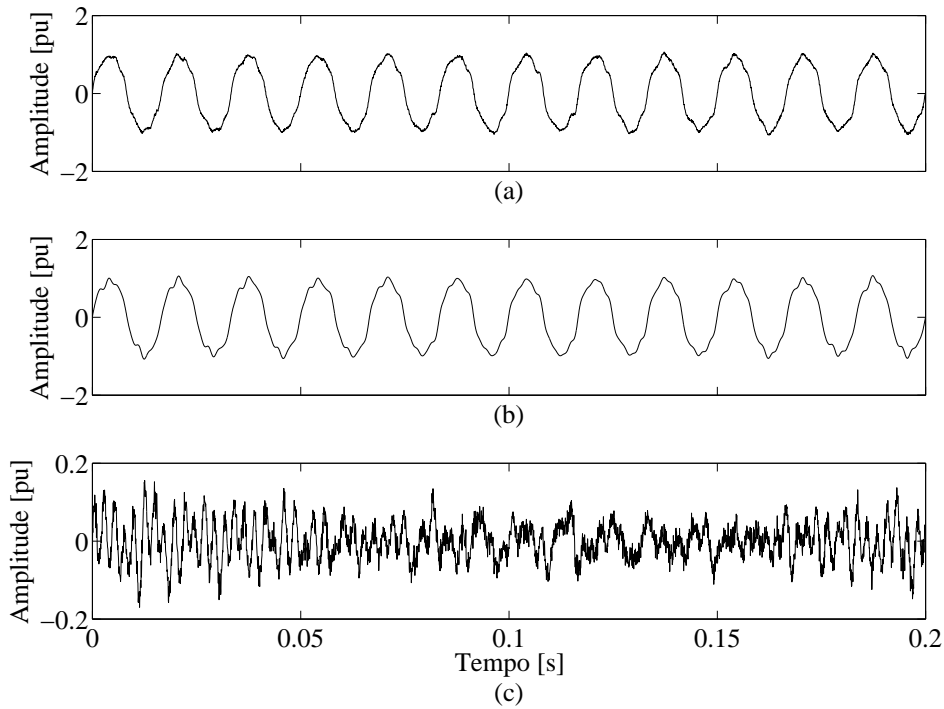


Figura 44 – Resultados do sinal de tensão com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Na Figura 44(c), o sinal do erro para aplicação do método Chang ultrapassa a faixa de -0,15 a 0,15 pu do resultado para o método IEC. No entanto, os valores se situam dentro de -0,2 a 0,2 pu. No método Chang, uma FG é estrategicamente estimada a partir da Eq. 3.7 que permite frequências não inteiras e não múltiplas da resolução, desta forma, o ajuste feito nos valores das frequências que aproxima para os valores inteiros e múltiplos de 5 Hz mais próximos introduziu erro na reconstrução do sinal. A frequência ajustada não está representando corretamente a frequência estimada pelo FG no método de agrupamento Chang.

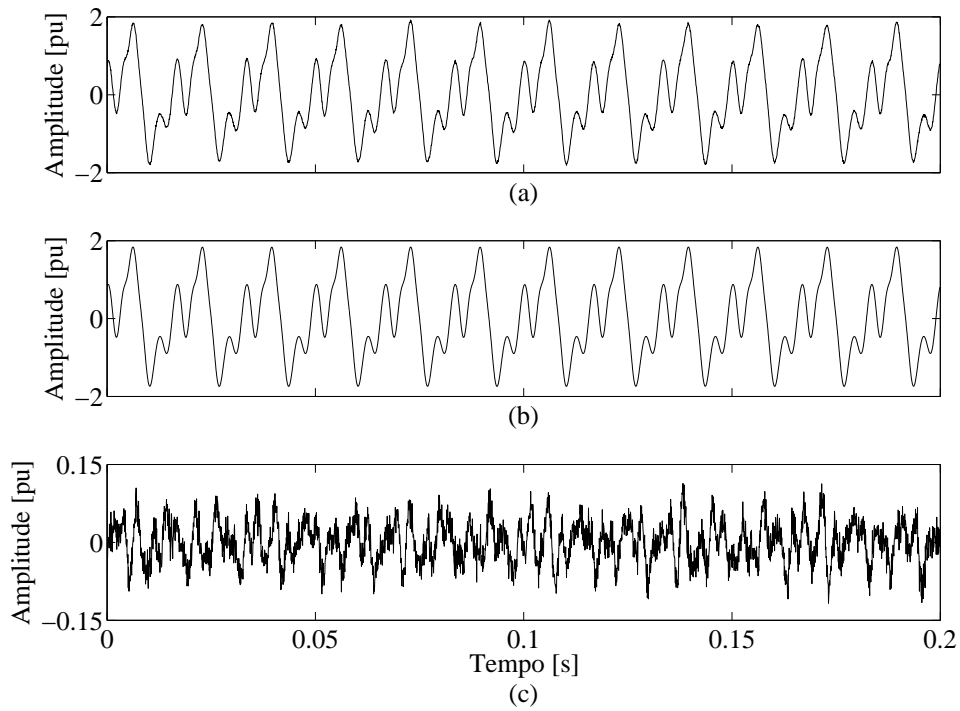


Figura 45 – Resultados do sinal de corrente com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

No caso da Fig. 45, onde representa os resultados do sinal de corrente que possui um conteúdo harmônico e inter-harmônico mais significativo, o resultado do sinal do erro apresentou valores que foram menores e se situaram dentro da faixa de -0,15 a 0,15 pu, conforme o resultado da aplicação do método IEC.

4.4.2 Reconstrução com o 1º algoritmo proposto

Os resultados da reconstrução do sinal de tensão e corrente pelo 1º algoritmo são apresentados a seguir pelas Fig. 46 e 47, respectivamente.

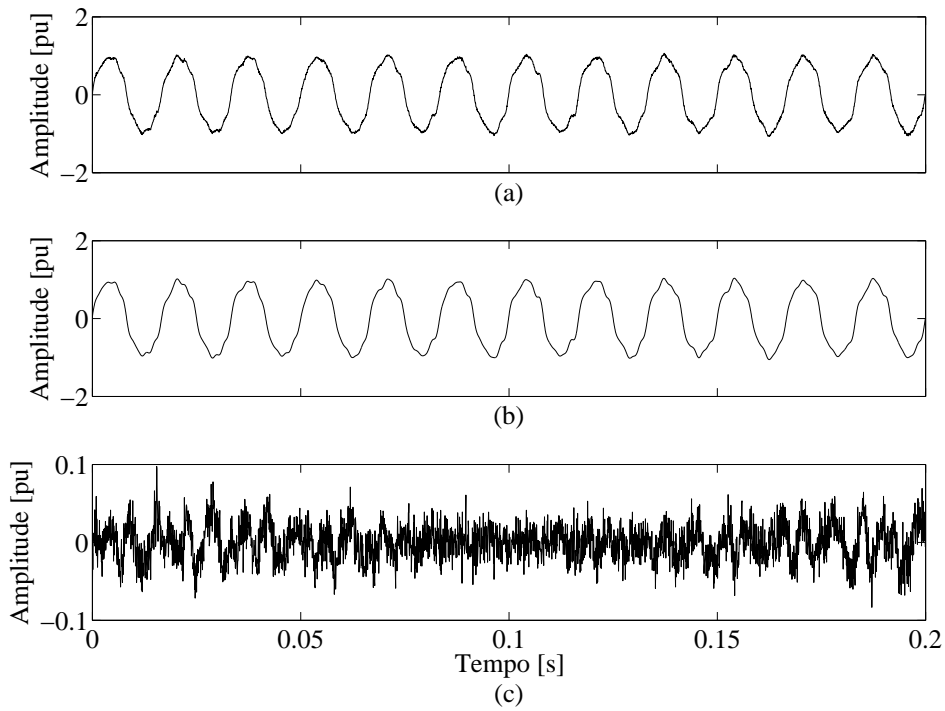


Figura 46 – Resultados do sinal de tensão com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

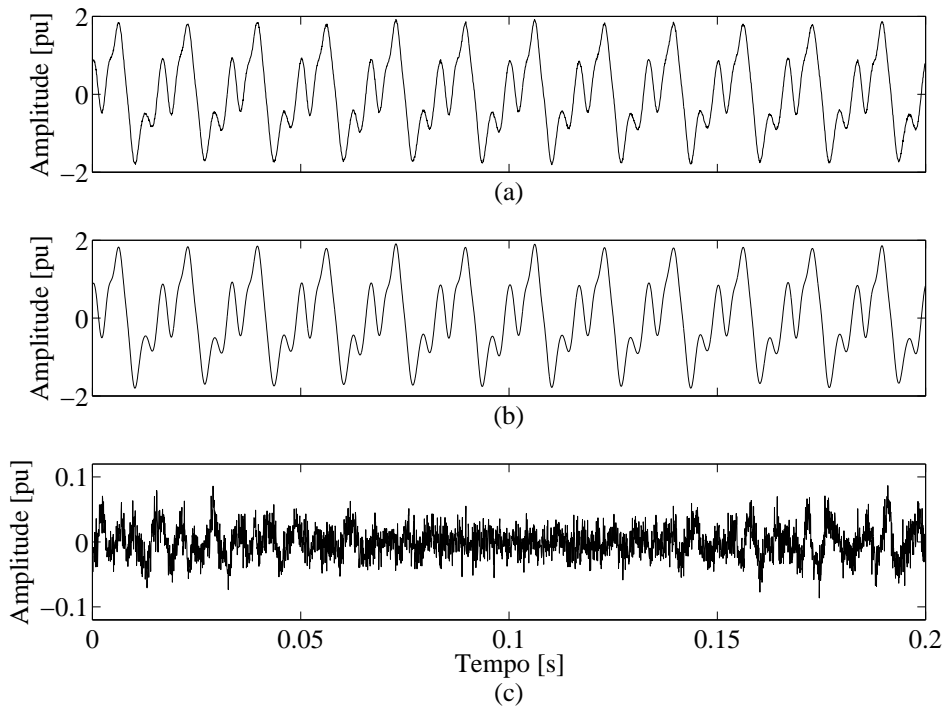


Figura 47 – Resultados do sinal de corrente com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Ao avaliar os resultados da Fig. 46, os valores do sinal do erro reduziram para uma faixa de -0,1 a 0,1 pu. O 1º algoritmo proposto é baseado no IEC com o ajuste da frequência do subgrupo inter-harmônico que deixa de ser na média conforme a Eq. 3.5

da seção 3.1.1 e passa ser na maior frequência da maior amplitude do espectro original, sem o agrupamento. O ajuste tende a se aproximar da componente real inter-harmônica que foi espalhada pelo vazamento espectral. O resultado mostra que o método funciona na redução do erro.

Na Figura 46, a região central do sinal do erro, entre 0,05 e 0,15 segundos, os valores estão em uma faixa de -0,05 a 0,05 pu. As diferenças são refletidas nos resultados da métrica desempenho SNR, mostrados a seguir.

Analogamente aos resultados do sinal de tensão, o sinal de corrente mostrado na Fig. 47 possui valores do sinal do erro na faixa de -0.1 a 0.1 pu.

4.4.3 Reconstrução com o 2º algoritmo proposto

Os resultados para o 2º algoritmo proposto são mostrados a seguir, pelas Fig. 48 e 49. Este algoritmo é uma extensão do 1º algoritmo proposto, onde o ajuste é para as duas maiores amplitudes do espectro original e a distribuição da energia é ponderada conforme as amplitudes máximas. Resumidamente, o objetivo deste algoritmo é aproximar uma componente de frequência não múltipla da resolução em frequências múltipla da resolução, ajustadas na amplitude a partir do agrupamento do vazamento espectral distribuído conforme as amplitude máximas.

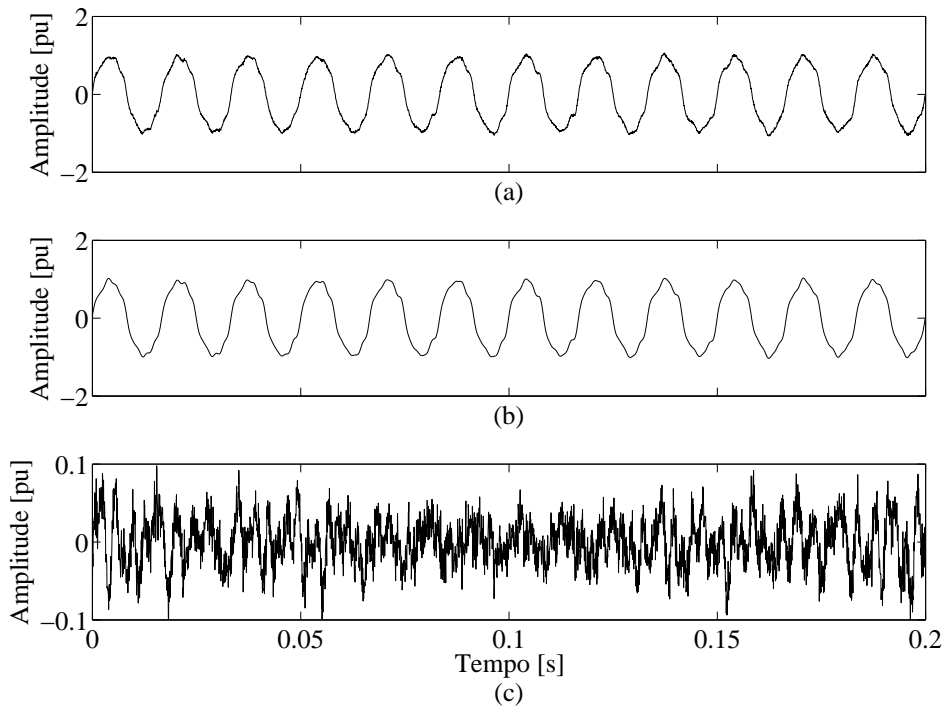


Figura 48 – Resultados do sinal de tensão com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Na Figura 48 os valores do erros são baixos na faixa de -0,05 a 0,05 apenas na região central do sinal em torno de 0,1 segundos. Por outro lado, no geral o sinal do erro

está contido em valores de -0,1 a 0,1.

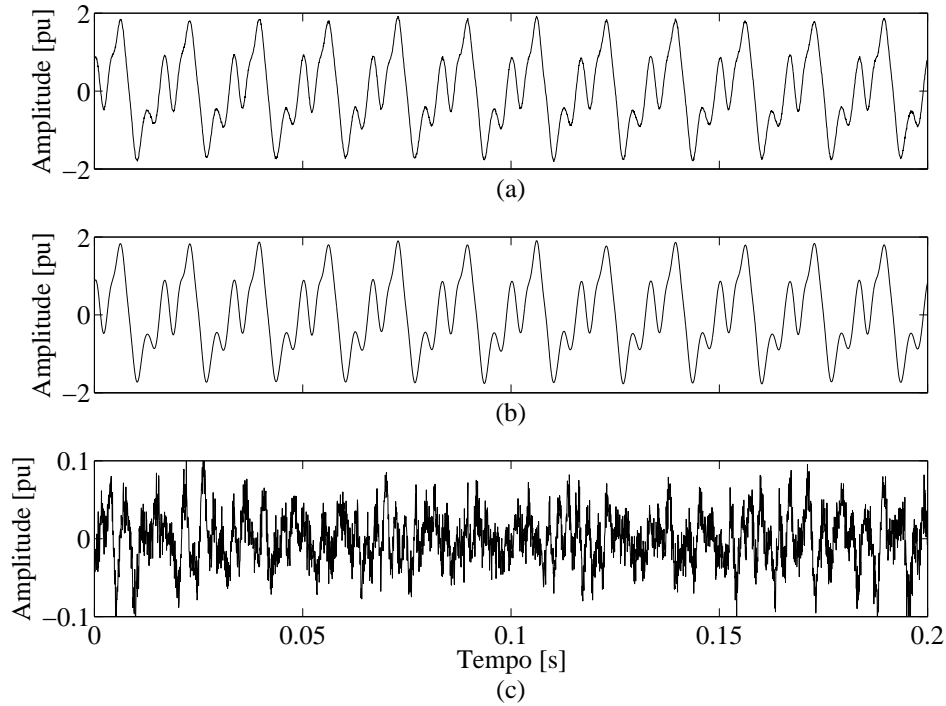


Figura 49 – Resultados do sinal de corrente com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Para o resultado do sinal de corrente da Fig. 49 é observado, de forma equivalente ao resultado do sinal de tensão.

A Tabela 10 apresenta os respectivos SNR de cada método avaliado. Os resultados mostram uma evolução nos valores de SNR, isto é, o 1º algoritmo possuiu os maiores valores, o que significa que a reconstrução teve menores erros conforme mostrado pelas Fig. 48(c) e 49(c). Os resultados entre o 1º algoritmo e os métodos IEC e Chang aumentaram em cerca de 5 a 6 dB para o sinal de tensão. Para o sinal de corrente a diferença foi de um aumento de 5 dB para o 1º algoritmo proposto.

Tabela 10 – Desempenho das reconstruções em SNR para os métodos avaliados.

Parâmetro	Sinal de tensão				Sinal de Corrente			
	IEC	Chang	1º Alg.	2º Alg.	IEC	Chang	1º Alg.	2º Alg.
SNR (dB)	25,11	23,42	29,90	27,72	27,60	27,74	32,38	30,34

Na tabela 11 são apresentado os valores da energia do sinal no domínio do tempo após a reconstrução utilizando o lado esquerdo da relação de Parseval da Eq. 2.14, os resultados são comparados com valor original.

Tabela 11 – Resultados das energias calculadas no domínio do tempo dos sinais reconstruídos com os métodos avaliados.

Sinal de tensão					Sinal de Corrente				
Orig.	IEC	Chang	1º Alg.	2º Alg.	Orig.	IEC	Chang	1º Alg.	2º Alg.
0,7117	0,7115	0,7115	0,7117	0,7114	0,9636	0,9635	0,9635	0,9636	0,9634

Os resultados mostram que a energia possui erro absoluto na ordem de 10^{-3} , esse erro está plenamente associado ao adição do ruído de medição, ou seja, após o agrupamento uma pequena parcela de ruído das frequências acima da última harmônica foram desprezadas, conseqüentemente, foi refletido um erro muito pequeno nos resultados da energia do sinal.

5 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado uma metodologia de teste de sensibilidade à amplitude e frequência realizados em sinais sintéticos, a fim de analisar os resultados de THD, TID e energia dos métodos de agrupamento IEC e Chang obtidos nas simulações. Além disso, foi abordado as formas de reconstrução dos sinais no domínio do tempo e duas propostas de algoritmos para otimização das reconstruções foram implementadas e avaliadas também com alguns sinais sintéticos.

Na primeira etapa apresentada no capítulo 2 foi realizada uma série de definições de conceitos abordados no trabalho, como o estudo sobre o vazamento espectral com tipos e efeitos causados. Uma revisão bibliográfica foi realizada acerca das técnicas de agrupamento de componentes harmônicas e inter-harmônicas existentes. Nesse sentido, foram destacados dois métodos, a norma IEC 61000-4-7 e o modelo proposto por Chang et al. (2004). Os métodos foram discutidos e implementados no capítulo 3 para uma abordagem de sinais sintéticos, a ideia foi obter os resultados com as simulações dos métodos para esses sinais e, com isso, calcular o THD, TID e a energia do espectro para cada situação. Desta forma, foi observado que havia discrepâncias nos resultados obtidos já mencionados no capítulo 4 com relação aos resultados teóricos, além disso, as discrepâncias foram mais significativas em sinais com inter-harmônicas de maiores valores em amplitude.

O capítulo 3, como já destacado, abordou a metodologia dos sinais construídos, dos métodos de agrupamento, das formas e propostas de reconstrução dos sinais do domínio do tempo a partir dos agrupamentos e de uma proposta de teste de sensibilidade à amplitude e frequência para avaliar o comportamento dos métodos quando sujeitos às variações de amplitudes e frequências. Essa metodologia do teste de sensibilidade possibilita uma análise mais detalhada do comportamento dos métodos e recomendações para execuções dos mesmos.

A metodologia de reconstrução permitiu avaliar diferentes propostas a fim de otimizar os resultados, diminuindo o erro e elevando os SNR. Nas propostas abordadas, destacam-se os 1º e 2º algoritmos de ajustes na frequência que permitiram elevar em 5 a 10 dB de SNR em comparação às propostas com os métodos IEC e Chang.

De fato, foi visto que a realização dos testes tornou visível o perfil das discrepâncias dos métodos com relação aos resultados teóricos e as possíveis condições (amplitude e frequência) para ocorrência das discrepâncias. Portanto, as devidas comparações foram feitas para os dois métodos a partir dos resultados e das discrepâncias do THD, TID e energia. E os resultados mostram que para a aplicação do método IEC quando há

inter-harmônicas nas regiões próximas a componente CC e as harmônicas, os valores de THD apresentam maiores discrepância e os valores se elevam cada vez mais a medida que amplitude da inter-harmônica aumenta. Para os valores de TID a região mais suscetível a discrepâncias elevadas abrange a componente fundamental, além da CC e das harmônicas. A energia do espectro é o único quase invariante com o teste de sensibilidade, os maiores erros foram da ordem de 0,3 %, sendo que há possibilidade de redução desse erro ao aplicar o agrupamento para além da última harmônica do sinal teste.

No método Chang, para medição de THD a única região menos sensível à presença de inter-harmônicas é a região próxima à fundamental, justamente na banda de frequência que inclui a fundamental (30 a 90 Hz). Nas demais regiões o nível sensibilidade está relacionado ao valor da amplitude da inter-harmônica, isto é, quanto maior o valor da amplitude maior a sensibilidade. Nessas regiões a frequência pouco interessa, pois pouco influencia e, portanto, a sensibilidade passa ser apenas com a amplitude. A respeito da energia, a interpretação é semelhante ao método IEC, sendo possível reduzir o erro da energia com a extensão do método de agrupamento.

As análises realizadas contribuem para especificar os limites de discrepâncias permitidos para quantificação adequada dos valores das harmônicas e inter-harmônicas, como também, das métricas de THD, TID e energia do espectro a partir dos métodos avaliados no escopo deste trabalho.

5.1 Trabalhos futuros

Neste trabalho foi introduzido formas e propostas de reconstrução no domínio do tempo do sinal agrupado na frequência a partir dos métodos IEC e Chang, nesse sentido, para trabalhos futuros é viável otimizar ainda mais os resultados das reconstruções realizadas neste trabalho. É sugerido novas formas de decomposição de inter-harmônicas não múltiplas da resolução em componentes múltiplas, a partir de algoritmos iterativos para estimação da amplitude, frequência e fase com erros predefinidos, tendo a possibilidade de ajuste tanto em amplitude quanto na fase dessas componentes.

A partir da metodologia exposta neste trabalho é sugerido para trabalhos futuros a aplicação do teste de sensibilidade para amplitude e frequência em novos métodos de quantificação de harmônicas e inter-harmônicas.

Além disso, é sugerido um aprimoramento dos métodos existentes para torná-los mais exatos ou a implementação de um novo método de agrupamento, sendo viável a realização do teste de sensibilidade apresentados neste trabalho, conforme sugerido anteriormente.

Referências

- ABADA, C. C. *Comparative Analysis of the Results from two Different Frequency Grouping Methods on the Currents and Temperatures of an Induction Motor Submitted to Harmonics and Interharmonics - Laboratory Tests*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília, Brasília-DF, Jul, 2018. Citado na página 36.
- ABNT. *NBR IEC 61000-4-30: Compatibilidade eletromagnética parte 4-30: Técnicas de medições e ensaios - métodos de medições de qualidade da energia*. Rio de Janeiro, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 19, 38 e 57.
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8—Qualidade da Energia Elétrica*. Brasília, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 59.
- BONFIM, F. de F. *Estudo Investigativo de Métodos Corretivos à Transformada de Fourier para a Análise e Estimção de Componentes Inter Harmônicos*. 2017. Citado na página 59.
- BRACALE, A. et al. Measurement of iec groups and subgroups using advanced spectrum estimation methods. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 57, n. 4, p. 672–681, Abr 2008. ISSN 0018-9456. Citado na página 32.
- CHANG, G. et al. Measuring power system harmonics and interharmonics by an improved fast fourier transform-based algorithm. In: *IET Generation, Transmission & Distribution*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 2, p. 192–201. ISSN 1751-8695. Citado na página 33.
- CHANG, Y.-N. et al. The estimation of interharmonics by group frequencies. In: *2004 IEEE Region 10 Conference TENCN 2004*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 3, p. 224–227. ISBN 0-7803-8560-8. Citado 8 vezes nas páginas 19, 32, 35, 39, 40, 41, 42 e 79.
- COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, v. 19, p. 297–301, 1965. Citado na página 24.
- CORMANE, J. *Compressão de dados para sinais de distúrbios no ambiente das redes elétricas inteligentes*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília,, Mar, 2013. Citado na página 56.
- DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2003. ISBN 0-07-138622-X. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- HANZELKA, Z.; BIEN, A. Harmônicas - inter-harmônicas. In: *Guia de Aplicação de Qualidade de Energia*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 1–24. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 31 e 59.
- HUI, J. et al. A method to improve the interharmonic grouping scheme adopted by iec standard 61000-4-7. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, p. 971–979, Abr, 2012. ISSN 0885-8977. Citado na página 33.

IEC. *International Standard 61000-4-7: Part 4-7: Testing and measurement techniques - general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connect thereto*. Geneva, 2002. 80 p. Citado 8 vezes nas páginas 19, 21, 31, 32, 35, 36, 44 e 45.

LIN, H.; CHEN, C. H.; LIU, L. Y. Harmonics and interharmonics measurement using group-harmonic power minimizing algorithm. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, WCE 2011*, v. 2, p. 1300–1305, Jul, 2011. Citado na página 33.

LIN, H.; HUANG, G.-S.; LIU, L. Y. Non-stationary harmonic tracking using piecewise-overlapped group-harmonic algorithm. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 3542–3547. Citado na página 33.

LIN, H. C. Inter-harmonic identification using group-harmonic weighting approach based on the fft. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 23, n. 3, p. 1309–1319, Maio, 2008. ISSN 0885-8993. Citado na página 32.

LIU, Z.; HIMMEL, J.; BONFIG, K. W. Improved processing of harmonics and interharmonics by time-domain averaging. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 4, p. 2370–2380, Out, 2005. ISSN 0885-8977. Citado na página 26.

MACEDO, J. R. *Uma contribuição à análise das componentes interharmônicas e seus efeitos nos indicadores de flutuação de tensão*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Dez, 2009. Citado na página 25.

MONTEIRO, H. L. M. *Cálculo de harmônicos e inter-harmônicos baseado na norma IEC 61000-4-7*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 26 e 59.

MONTEIRO, H. L. M. et al. Comparison of interpolation methods in time and frequency domain for the estimation of harmonics and interharmonics according to iec standard. In: *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. ISSN 2164-0610. Citado na página 33.

OLIVEIRA, W. R. de. *Uma Contribuição para a Medição de Distorções Harmônicas e Inter-harmônicas em Instalações de Geração Fotovoltaica*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília, Brasília-DF, Set, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 58.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-time signal processing*. 3. ed. [S.l.]: Series, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 41.

TESTA, A.; GALLO, D.; LANGELLA, R. On the processing of harmonics and interharmonics: Using hanning window in standard framework. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, p. 1581–1586, Jan, 2004. Citado na página 31.

YUAN, X. et al. Measurement method of harmonics and inter-harmonics with nonsynchronous sampling in iec framework. In: *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 123–128. ISSN 2161-749X. Citado na página 33.

Apêndices

APÊNDICE A – Demais resultados do teste de sensibilidade

Os resultados do THD, TID e Energia são apresentados, assim como, as discrepâncias para as demais configurações do método IEC 61000-4-7.

A.1 THD

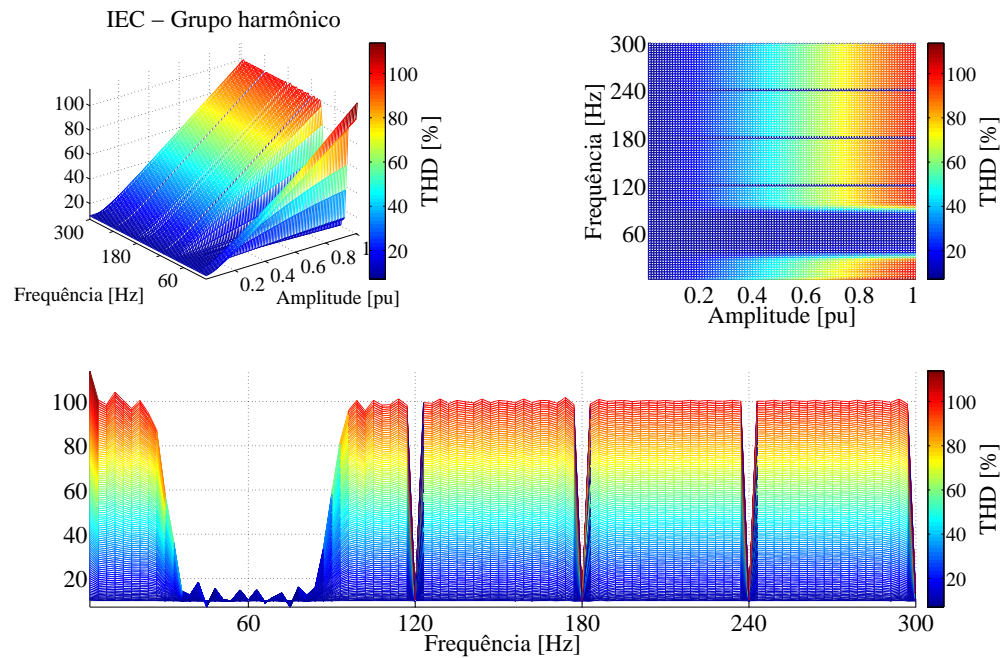


Figura 50 – Resultados dos THD do método IEC - Grupo harmônico ao longo do teste de sensibilidade

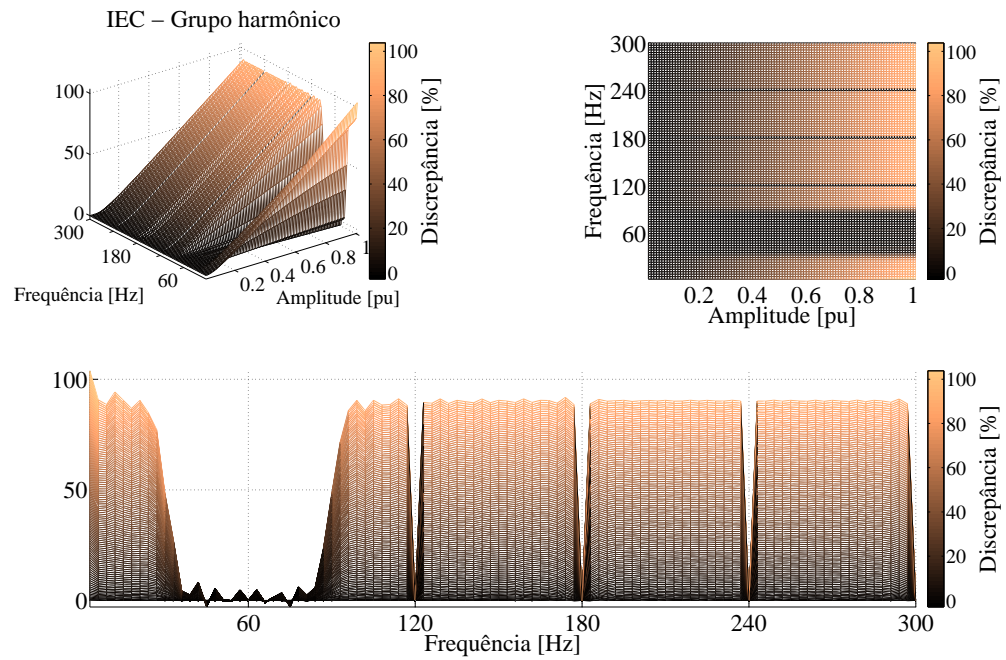


Figura 51 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo harmônico (Fig. 50) e o valor do THD original (Fig. 29).

A.2 TID

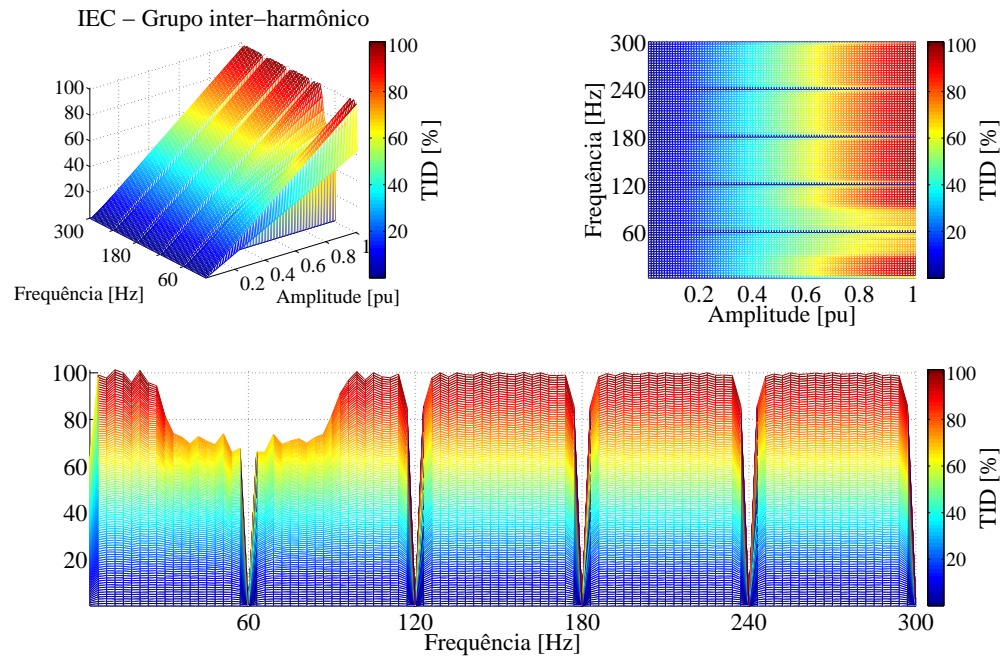


Figura 52 – Resultados dos TID do método IEC - Grupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

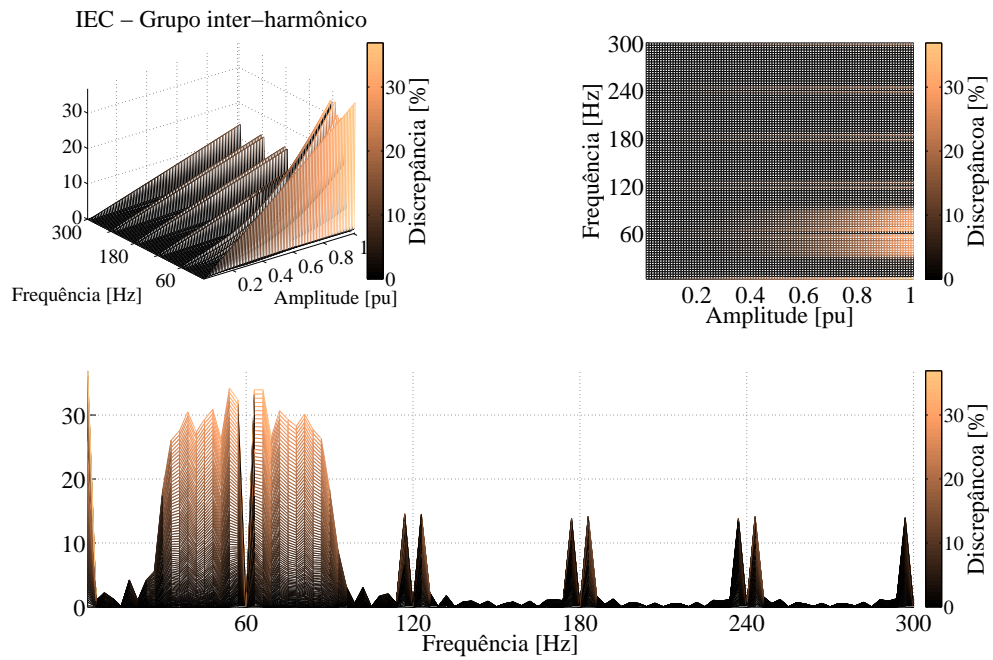


Figura 53 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo inter-harmônico (Fig. 52) e os valores dos TID originais (Fig. 34).

A.3 Energia do Espectro

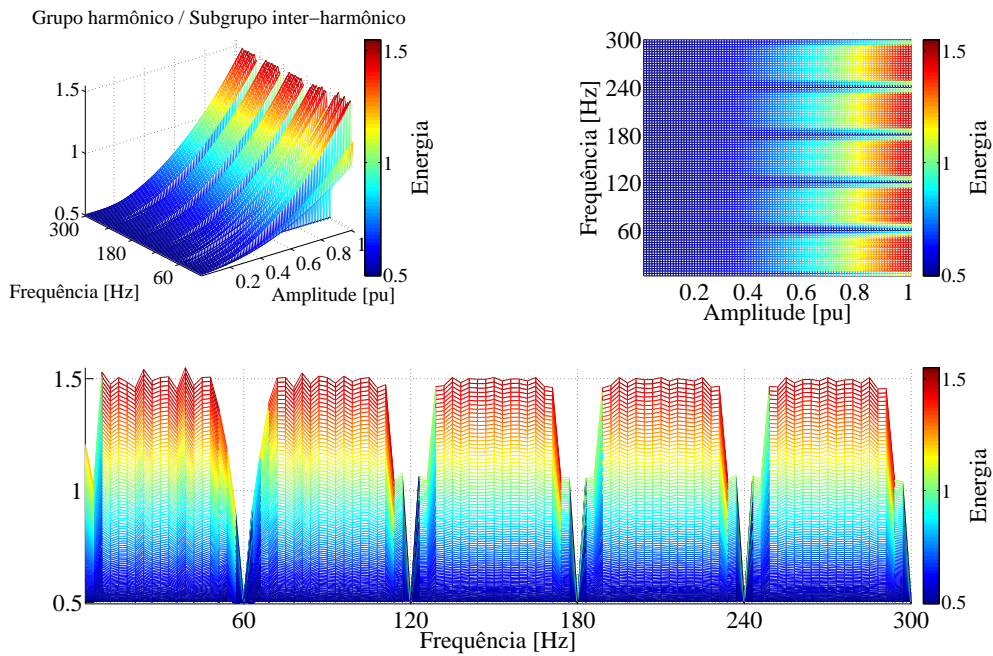


Figura 54 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Grupo harmônico / Subgrupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade

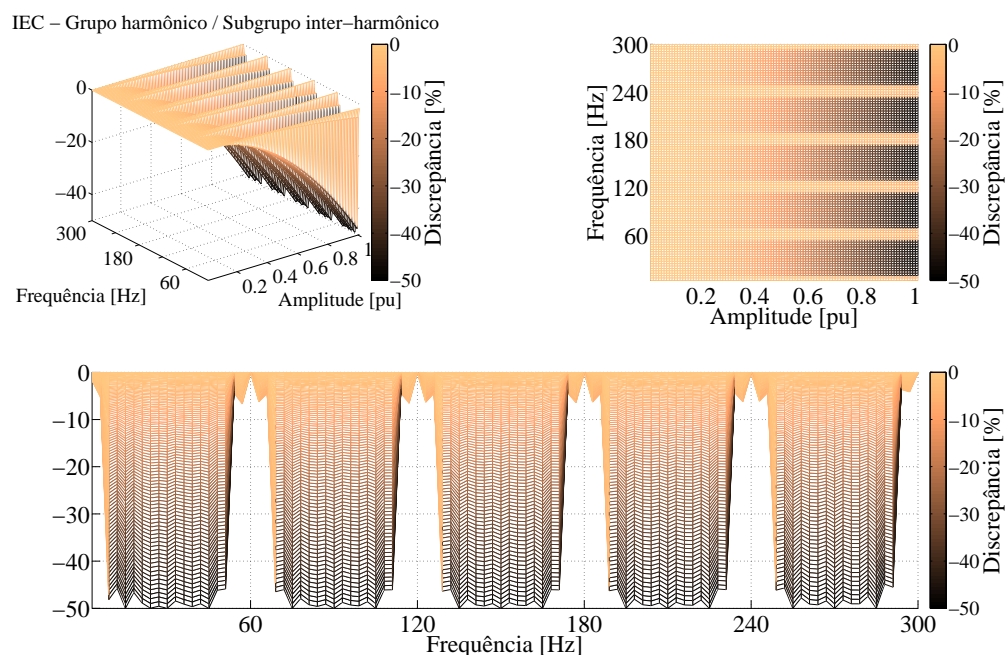


Figura 55 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo harmônico / Subgrupo inter-harmônico (Fig. 54) e o valores das energias originais (Fig. 37).

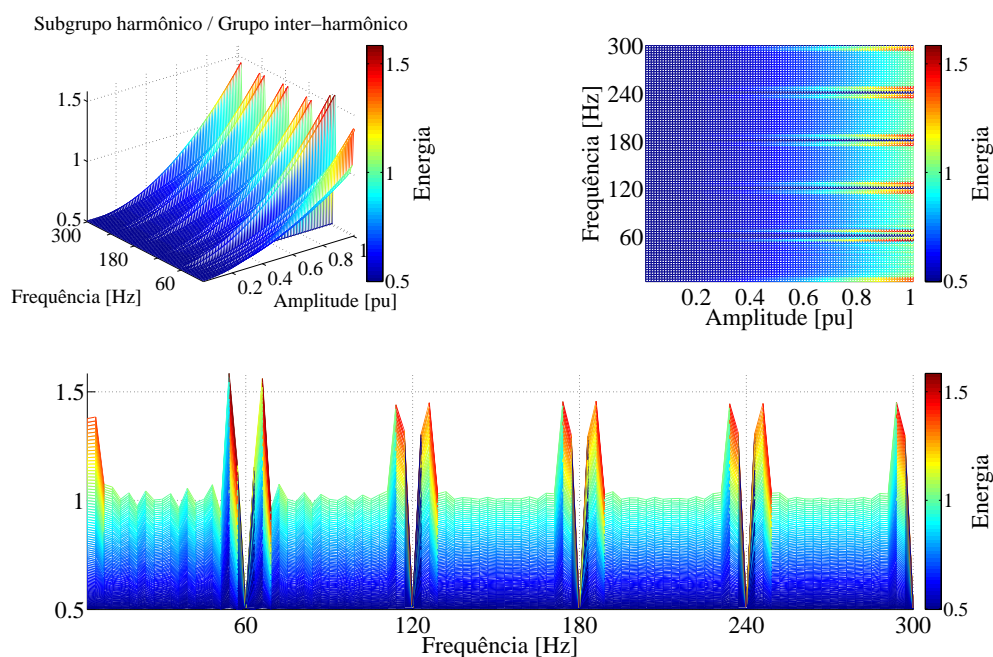


Figura 56 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Subgrupo harmônico / Grupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

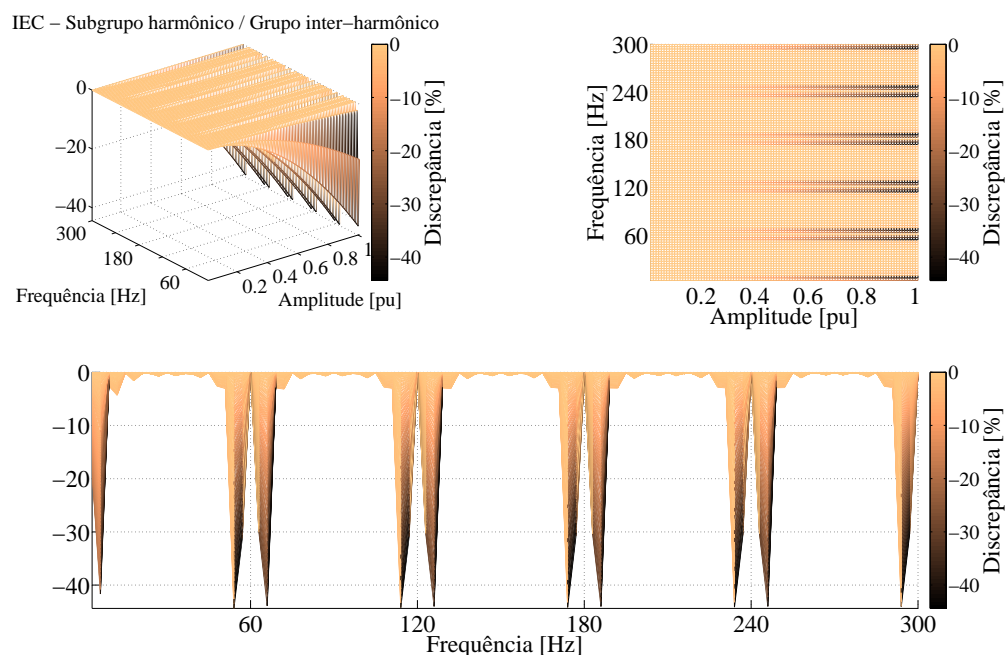


Figura 57 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Subgrupo harmônico / Grupo inter-harmônico (Fig. 56) e o valores das energias originais (Fig. 37).

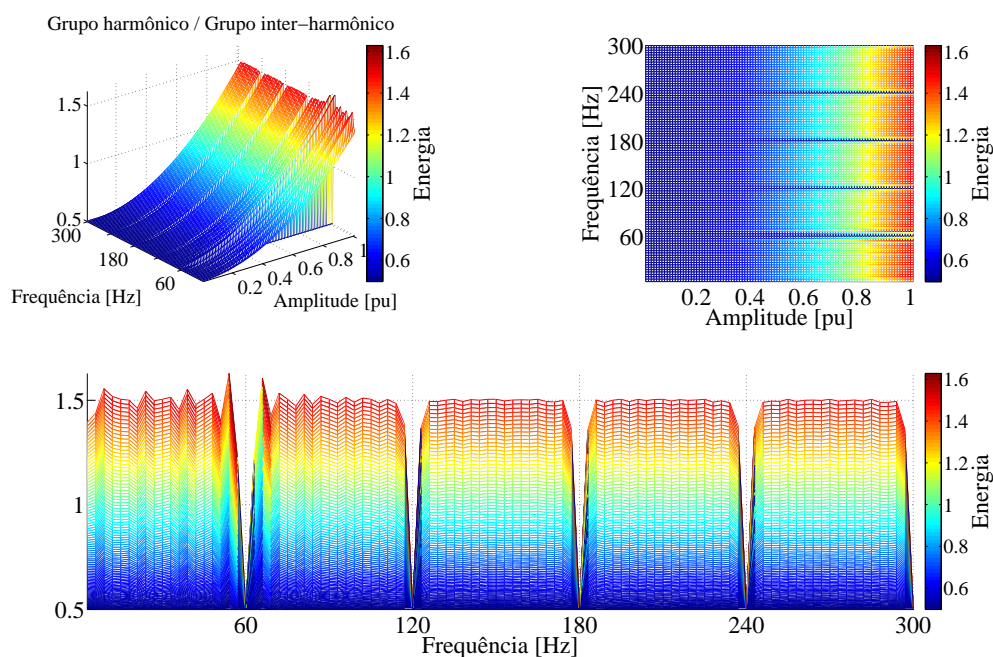


Figura 58 – Resultados das energias dos espectros do método IEC - Grupo harmônico / inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

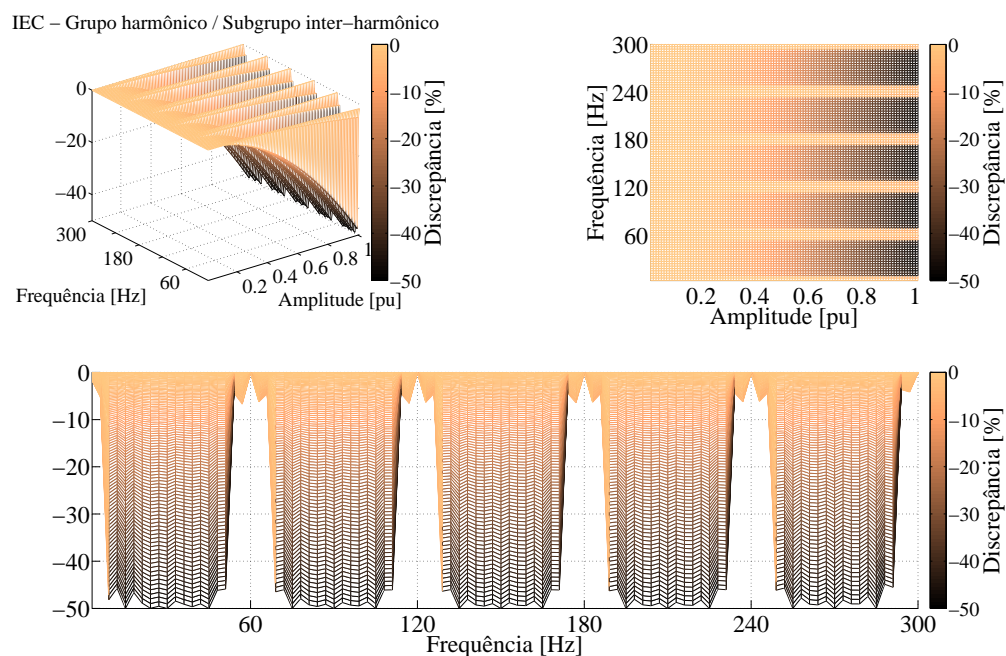


Figura 59 – Discrepâncias entre os resultados do IEC - Grupo harmônico / inter-harmônico (Fig. 58) e o valores das energias originais (Fig. 37).

APÊNDICE B – Resultados da reconstrução para outros sinais

B.1 Sinal de corrente com inter-harmônicas (Tab. 4)

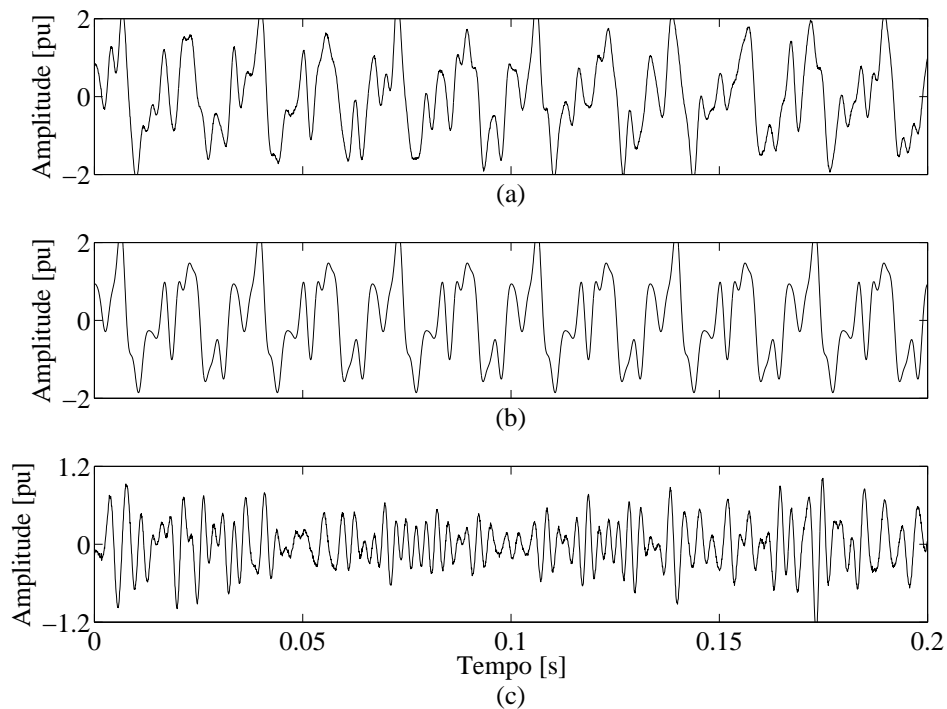


Figura 60 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônica com método IEC com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

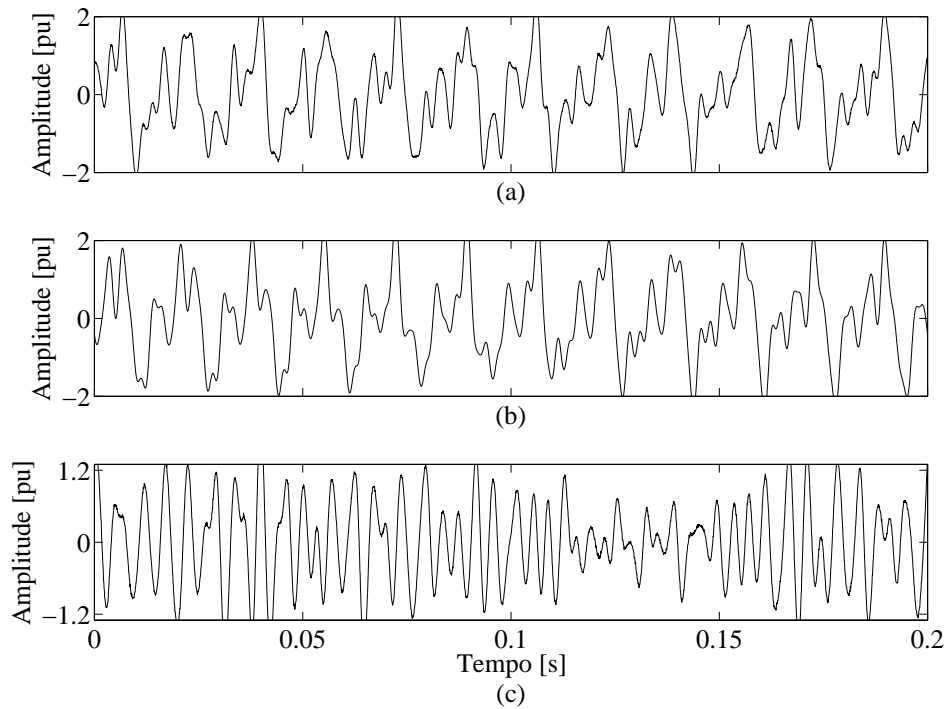


Figura 61 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônica com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

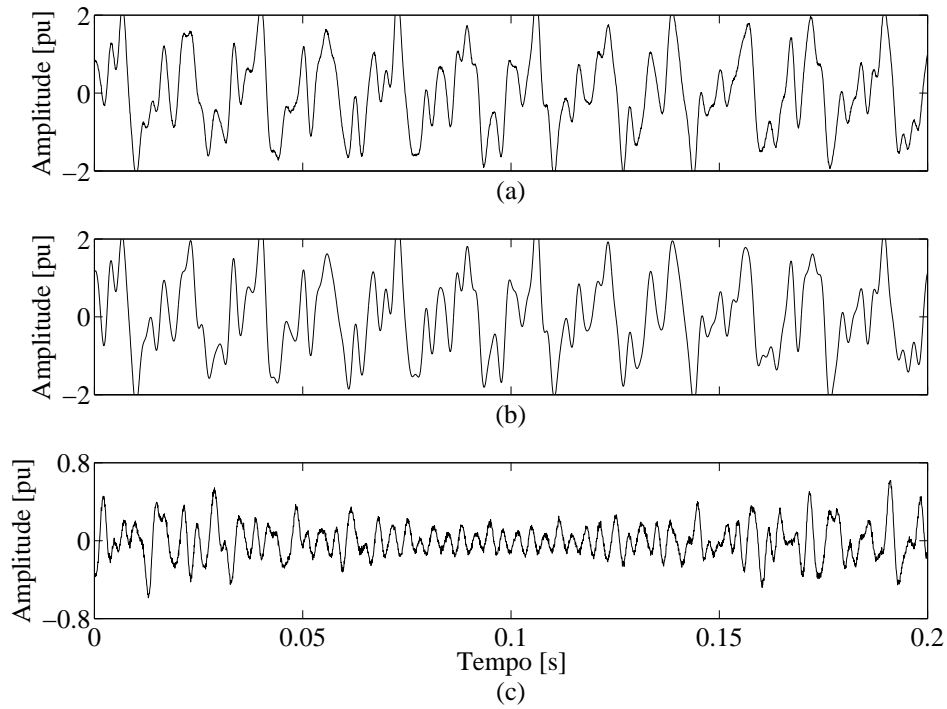


Figura 62 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônico com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

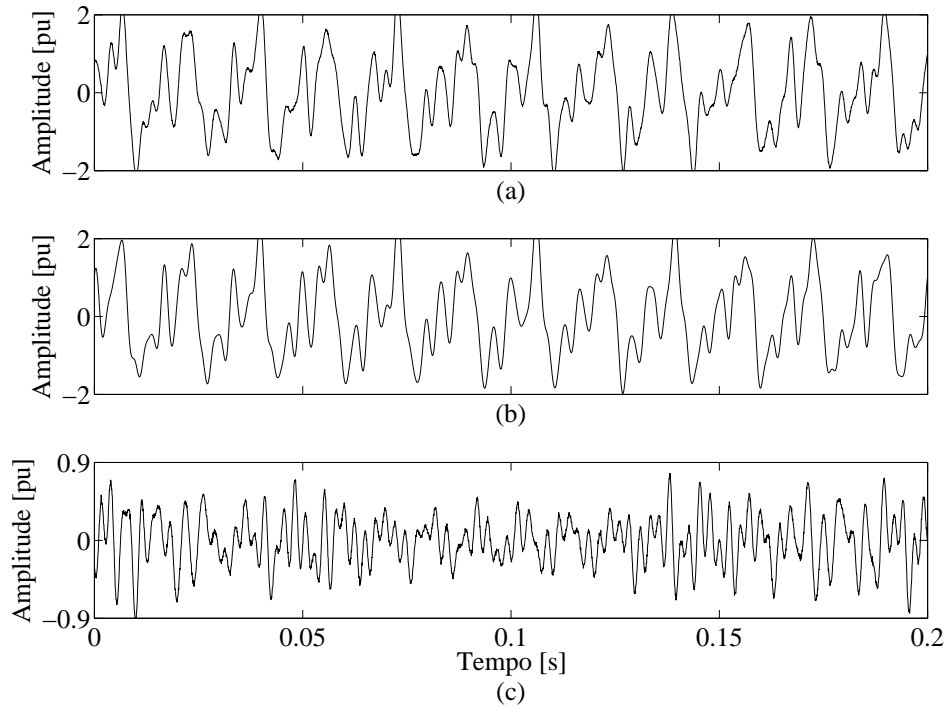


Figura 63 – Resultados do sinal de corrente com inter-harmônicas com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Tabela 12 – Desempenho da reconstrução do sinal de corrente (Tab. 4) em SNR para os métodos avaliados.

Parâmetro	Sinal de Corrente			
	IEC	Chang	1º Algoritmo	2º Algoritmo
SNR (dB)	8,96	3,20	15,22	11,87

Tabela 13 – Resultados das energias calculadas no domínio do tempo dos sinal de corrente (Tab. 4) reconstruído com os métodos avaliados.

Sinal de Corrente				
Original	IEC	Chang	1º Algoritmo	2º Algoritmo
1,0242	1,0241	1,0241	1,0345	1,0141

B.2 Sinal de corrente não estacionário com harmônicas e inter-harmônicas

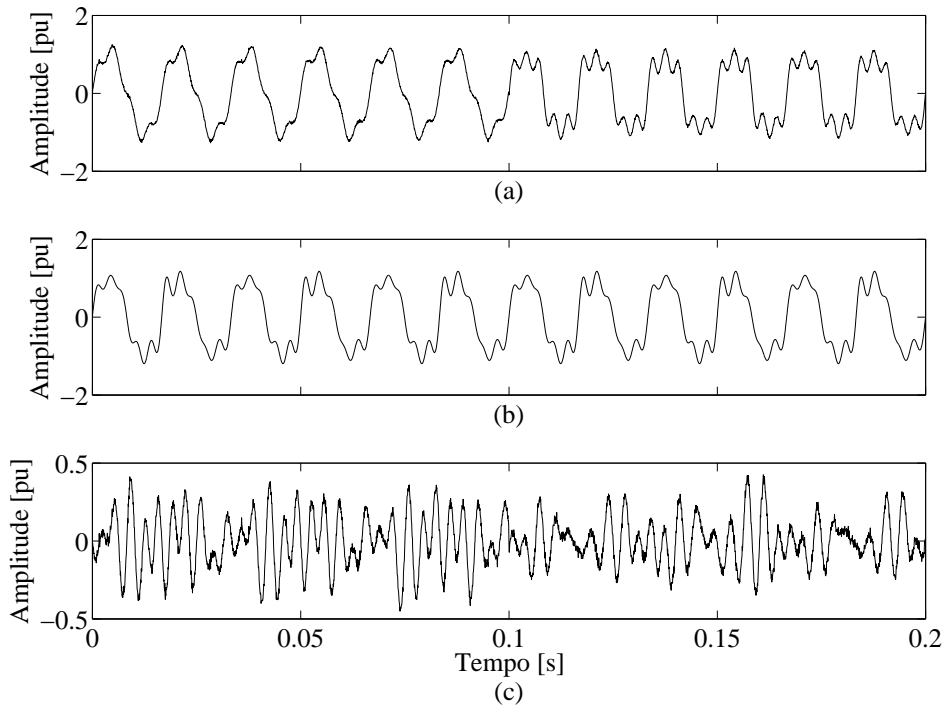


Figura 64 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com método IEC com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

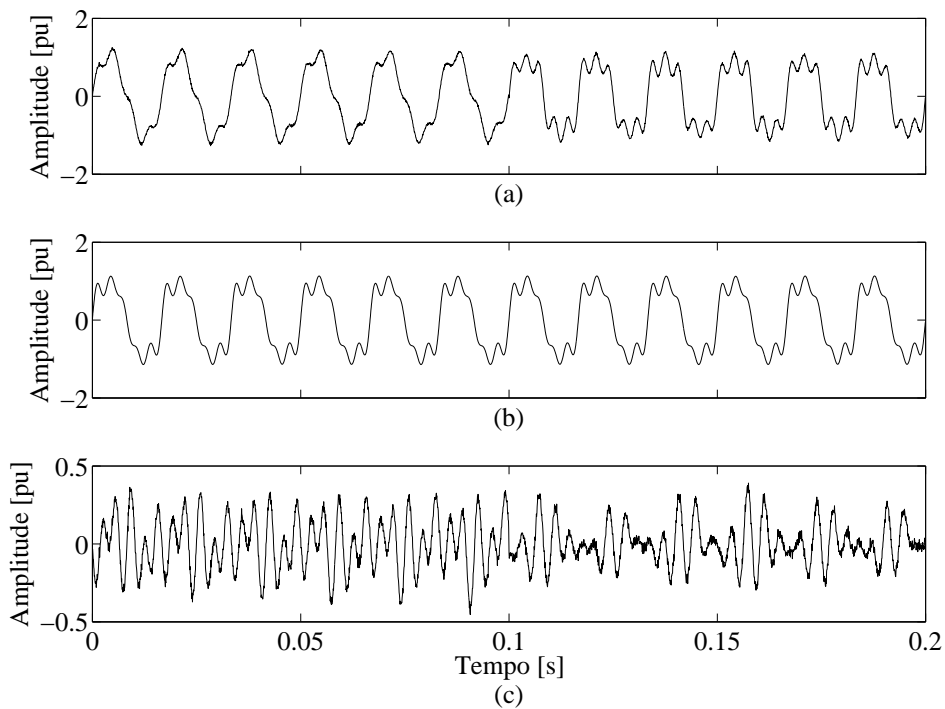


Figura 65 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com método Chang com fase predominante. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

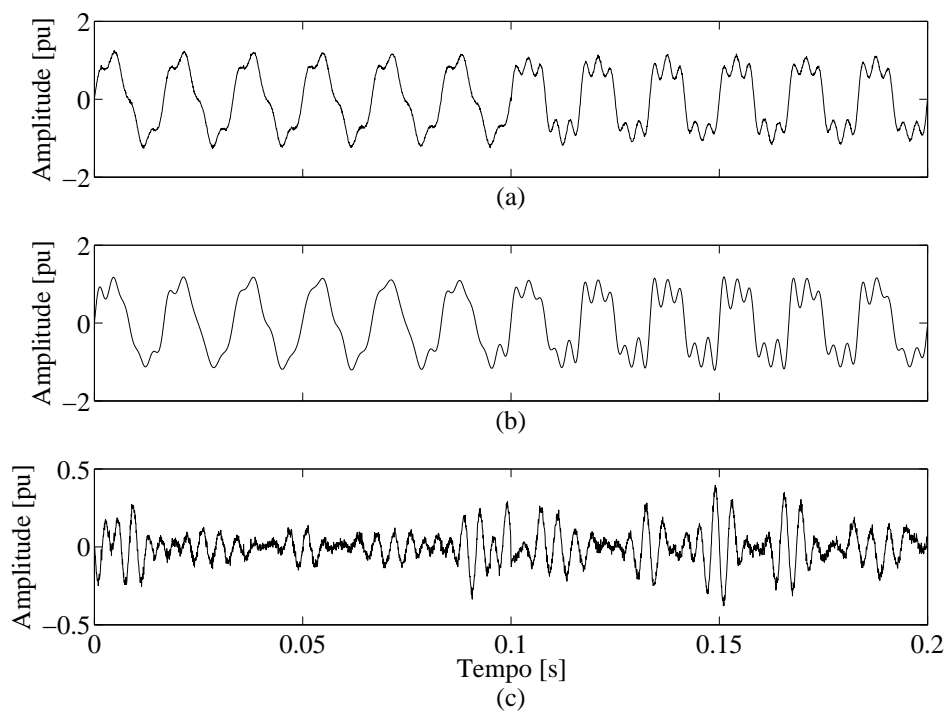


Figura 66 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com 1º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

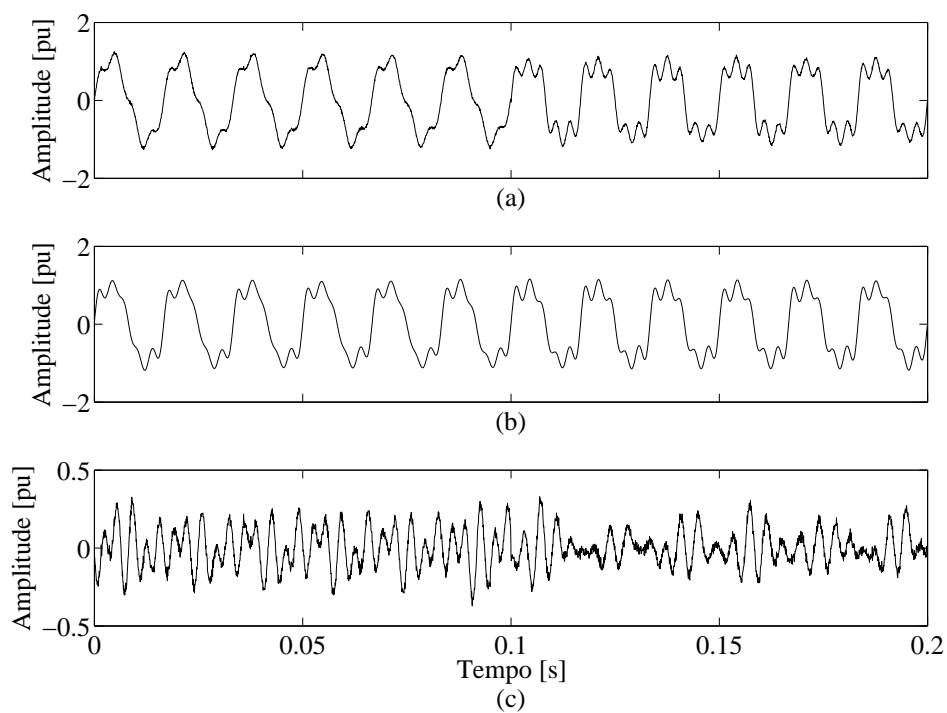


Figura 67 – Resultados do sinal de corrente não estacionário com 2º algoritmo proposto. (a) Sinal original. (b) Sinal reconstruído. (c) Sinal do erro (E).

Tabela 14 – Desempenho da reconstrução do sinal de corrente não estacionário em SNR para os métodos avaliados.

Parâmetro	Sinal de Corrente			
	IEC	Chang	1º Algoritmo	2º Algoritmo
SNR (dB)	13,43	13,83	17.17	15.85

Tabela 15 – Resultados das energias calculadas no domínio do tempo dos sinal de corrente não estacionário, reconstruído com os métodos avaliados.

Original	Sinal de Corrente			
	IEC	Chang	1º Algoritmo	2º Algoritmo
0,7638	0,7636	0,7635	0,7747	0,7624


```
23     sinal=sinal + a_har(k)*sin(2*pi*f_har(k)*t+phi(k))';
24 end
25 sinal_ruido=awgn(sinal,35);
26
27 end
```

C.2 Código do método IEC

```

1  % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
2  % Metodo de agrupamento IEC 61000-4-7 %
3  % Autor: Fabricio de Matos Alves %
4  % Engenharia de Energia- UnB %
5  % Faculdade do Gama - FGa %
6  % TCC %
7  % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
8
9  function [THDG,THDS,TIDG,TIDS,THD_sinal_orig,TID_sinal_orig,↵
    E_sinal,E_sinal_eq,E_sinal_eq2,E_sinal_eq3,E_sinal_eq4,V_IEC4↵
    ,F_IEC4]=metodo_IEC(naj,sinal,a_har,f_har)
10
11 f_o=60; %frequencia fundamental
12 nac=256; % numero de amostras por ciclo
13 transf = fft(sinal); % transformada de fourier
14 mag= abs(transf/naj); % modulo da transformada
15 mag_ajuste = mag(1:(naj/2+1))'; % (N/2+1) coeficientes
16 mag_ajuste(1:end-1) = 2*mag_ajuste(1:end-1); % ajuste da ↵
    potencia para um lado do espectro
17 mag_ajuste=mag_ajuste/sqrt(2); % valor em RMS
18 Fs = nac*f_o; % frequencia de amostragem
19 freq = Fs*(0:(naj/2))/naj; % vetor de frequencias
20
21 har=0; %contadores de harmonicas
22 int_har=0; %contadores de inter-harmonicas
23 for i=1:length(f_har)
24 inteiro=floor(f_har(i)/f_o);
25     if inteiro==f_har(i)/f_o && inteiro>1
26         har=har+1;
27     else

```

```

28         int_har=int_har+1;
29     end
30 end
31
32 %% Grupo harmonico/ subgrupo inter-harmonico
33 kk=0; % contador
34 V_IEC=[];
35 F_IEC=[];
36 for i=1:(max(f_har)/5+1)
37     if freq(i)==0
38         kk=kk+1;
39         V_IEC(kk)=sqrt(sum([mag_ajuste(i:1:i+5).^2 (mag_ajuste(i+6)↵
40             .^2)/2])));
41         F_IEC(kk)=freq(i);
42         kk=kk+1;
43         V_IEC(kk)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+2:1:i+10).^2));
44         F_IEC(kk)=(freq(i)+f_o)/2;
45     end
46     if freq(i)==f_o
47         kk=kk+1;
48         V_IEC(kk)=sqrt(sum([mag_ajuste((i-5):1:i).^2 mag_ajuste(↵
49             i+1:1:i+5).^2 (mag_ajuste(i-6).^2)/2 (mag_ajuste(i+6)↵
50             .^2)/2])));
51         F_IEC(kk)=freq(i);
52         kk=kk+1;
53         V_IEC(kk)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+2:1:i+10).^2));
54         F_IEC(kk)=(f_o+2*f_o)/2;
55     end
56     N=freq(i)/f_o;
57     k=floor(N);
58     if N==k && k>=2
59         kk=kk+1;
60         V_IEC(kk)=sqrt(sum([mag_ajuste((i-5):1:i).^2 mag_ajuste(↵
61             i+1:1:i+5).^2 (mag_ajuste(i-6).^2)/2 (mag_ajuste(i+6)↵
62             .^2)/2])));
63         F_IEC(kk)=freq(i);
64         kk=kk+1;
65         V_IEC(kk)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+2:1:i+10).^2));
66         if int_har>1
67             F_IEC(kk)=(freq(i)+freq(i+12))/2;
68         end
69     end
70 end

```

```

65 end
66 V_IEC=V_IEC(1:kk-1);
67 F_IEC=F_IEC(1:kk-1);
68
69
70 %% Subgrupo harmonico/ grupo inter-harmonico
71 kk2=0;
72 V_IEC2=[];
73 F_IEC2=[];
74 for i=1:(max(f_har)/5+1)
75     if freq(i)==0
76         kk2=kk2+1;
77         V_IEC2(kk2)=sqrt(sum([mag_ajuste(i) mag_ajuste(i+1)].^2));
78         F_IEC2(kk2)=freq(i);
79         kk2=kk2+1;
80         V_IEC2(kk2)=sqrt(sum(mag_ajuste((i+1):1:(i+11)).^2));
81         F_IEC2(kk2)=(freq(i)+f_o)/2;
82     end
83     if freq(i)==f_o
84         kk2=kk2+1;
85         V_IEC2(kk2)=sqrt(sum(mag_ajuste((i-1):1:(i+1)).^2));
86         F_IEC2(kk2)=freq(i);
87         kk2=kk2+1;
88         V_IEC2(kk2)=sqrt(sum(mag_ajuste((i+1):1:(i+11)).^2));
89         F_IEC2(kk2)=(f_o+2*f_o)/2;
90     end
91     N2=freq(i)/f_o;
92     k2=floor(N2);
93     if N2==k2 && k2>=2
94         kk2=kk2+1;
95         V_IEC2(kk2)=sqrt(sum(mag_ajuste((i-1):1:(i+1)).^2));
96         F_IEC2(kk2)=freq(i);
97         kk2=kk2+1;
98         V_IEC2(kk2)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+1:1:i+11).^2));
99         if int_har>1
100             F_IEC2(kk2)=(freq(i)+freq(i+12))/2;
101         end
102     end
103 end
104
105
106 %% Grupo harmonico/ Grupo inter-harmonico

```



```

107 kk3=0; % contador
108 V_IEC3=[];
109 F_IEC3=[];
110 for i=1:(max(f_har)/5+1)
111     if freq(i)==0
112         kk3=kk3+1;
113         V_IEC3(kk3)=sqrt(sum([mag_ajuste(i:1:i+5).^2 (mag_ajuste(i+
+6).^2)/2]));
114         F_IEC3(kk3)=freq(i);
115         kk3=kk3+1;
116         V_IEC3(kk3)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+1:1:i+11).^2));
117         F_IEC3(kk3)=(freq(i)+f_o)/2;
118     end
119     if freq(i)==f_o
120         kk3=kk3+1;
121         V_IEC3(kk3)=sqrt(sum([mag_ajuste((i-5):1:i).^2 (
mag_ajuste(i+1:1:i+5).^2 (mag_ajuste(i-6).^2)/2 (
mag_ajuste(i+6).^2)/2]));
122         F_IEC3(kk3)=freq(i);
123         kk3=kk3+1;
124         V_IEC3(kk3)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+1:1:i+11).^2));
125         F_IEC3(kk3)=(f_o+2*f_o)/2;
126     end
127     N3=freq(i)/f_o;
128     k3=floor(N3);
129     if N3==k3 && k3>=2
130         kk3=kk3+1;
131         V_IEC3(kk3)=sqrt(sum([mag_ajuste((i-5):1:i).^2 (
mag_ajuste(i+1:1:i+5).^2 (mag_ajuste(i-6).^2)/2 (
mag_ajuste(i+6).^2)/2]));
132         F_IEC3(kk3)=freq(i);
133         kk3=kk3+1;
134         V_IEC3(kk3)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+1:1:i+11).^2));
135         if int_har>1
136             F_IEC3(kk3)=(freq(i)+freq(i+12))/2;
137         end
138     end
139 end
140
141
142
143 %% Subgrupo harmonico/ Subgrupo inter-harmonico

```

```

144 kk4=0; %contador
145 V_IEC4=[];
146 F_IEC4=[];
147 for i=1:(max(f_har)/5+1)
148     if freq(i)==0
149         kk4=kk4+1;
150         V_IEC4(kk4)=sqrt(sum([mag_ajuste(i) mag_ajuste(i+1)].^2));
151         F_IEC4(kk4)=freq(i);
152         kk4=kk4+1;
153         V_IEC4(kk4)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+2:1:i+10).^2));
154         F_IEC4(kk4)=(freq(i)+f_o)/2;
155     end
156     if freq(i)==f_o
157         kk4=kk4+1;
158         V_IEC4(kk4)=sqrt(sum(mag_ajuste((i-1):1:(i+1)).^2));
159         F_IEC4(kk4)=freq(i);
160         kk4=kk4+1;
161         V_IEC4(kk4)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+2:1:i+10).^2));
162         F_IEC4(kk4)=(f_o+2*f_o)/2;
163     end
164     N4=freq(i)/f_o;
165     k4=floor(N4);
166     if N4==k4 && k4>=2
167         kk4=kk4+1;
168         V_IEC4(kk4)=sqrt(sum(mag_ajuste((i-1):1:(i+1)).^2));
169         F_IEC4(kk4)=freq(i);
170         kk4=kk4+1;
171         V_IEC4(kk4)=sqrt(sum(mag_ajuste(i+2:1:i+10).^2));
172         if int_har>1
173             F_IEC4(kk4)=(freq(i)+freq(i+12))/2;
174         end
175     end
176 end
177
178
179
180 % Grupo harmonico/subgrupo inter-harmonico & Subgrupo harmonico/↔
    grupo inter-harmonico
181
182 %Distorcao harmonica total de grupo
183 THDG=sqrt(sum((V_IEC(1) V_IEC(5:2:length(V_IEC)))/V_IEC(3)).^2)↔
    );

```

```

184 %Distorcao harmonica total de subgrupo
185 THDS=sqrt(sum((V_IEC2(1) V_IEC2(5:2:length(V_IEC2)))/V_IEC2(3))↵
    .^2));
186 %Distorcao inter-harmonica total de grupo
187 TIDG=sqrt(sum((V_IEC2(2:2:length(V_IEC2))/V_IEC(3)).^2));
188 %Distorcao inter-harmonica total de subgrupo
189 TIDS=sqrt(sum((V_IEC(2:2:length(V_IEC))/V_IEC2(3)).^2));
190
191
192
193
194 THD_sinal_orig= sqrt(sum((a_har(1) a_har(5:2:length(a_har)))/↵
    a_har(3)).^2)); %Distorcao harmonica total original
195 TID_sinal_orig= sqrt(sum((a_har(2:2:length(a_har))/a_har(3)).^2)↵
    ); %Distorcao inter-harmonica total original
196
197
198
199 E_sinal=sqrt(sum(mag_ajuste(:).^2)); % Energia do sinal original
200 E_sinal_eq=sqrt(sum(V_IEC(:).^2)); % Energia do sinal ↵
    equivalente (grupo harmonico/subgrupo inter-harmonico)
201 E_sinal_eq2=sqrt(sum(V_IEC2(:).^2)); % Energia do sinal ↵
    equivalente (subgrupo harmonico/grupo inter-harmonico)
202 E_sinal_eq3=sqrt(sum(V_IEC3(:).^2)); % Energia do sinal ↵
    equivalente (grupo harmonico/grupo inter-harmonico)
203 E_sinal_eq4=sqrt(sum(V_IEC4(:).^2)); % Energia do sinal ↵
    equivalente (subgrupo harmonico/subgrupo inter-harmonico)
204
205 end

```

C.3 Código do método Chang

```

1 % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
2 % Metodo de agrupamento Chang %
3 % Autor: Fabricio de Matos Alves %
4 % Engenharia de Energia- UnB %
5 % Faculdade do Gama - FGa %
6 % TCC %

```

```

7  % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
8
9  function [F_chang,V_chang,THD_chang,E_sinal_chang]=metodo_chang(↵
    naj,f_har,a_har,sinal)
10
11  transf = fft(sinal); % transformada de fourier
12  mag= abs(transf/naj); % modulo da transformada
13  mag_ajuste = mag(1:(naj/2+1))'; % (N/2+1) coeficientes
14  mag_ajuste(1:end-1) = 2*mag_ajuste(1:end-1);% ajuste da potencia↵
    para um lado do espectro
15  mag_ajuste=mag_ajuste/sqrt(2); % valor em RMS
16  f_o=60; %frequencia fundamental
17  nac=256; % numero de amostras por ciclo
18  Fs = nac*f_o; % frequencia de amostragem
19  freq = Fs*(0:(naj/2))/naj; %vetor de frequencias
20
21  k=[];
22  V_chang=[];
23  F_chang=[];
24  N=(max(f_har)-30)/f_o;
25  NN=ceil(N);
26  V_chang(1)=sqrt(sum(mag_ajuste(1:(0.5*f_o/5)).^2));
27  k(1)=sum((freq(1:(0.5*f_o/5))/f_o.*mag_ajuste(1:(0.5*f_o/5)))↵
    .^2)/(sum(mag_ajuste((1:0.5*f_o/5)).^2));
28  F_chang(1)=sqrt(k(1))*f_o;
29  if N==NN
30      for i=1:NN
31          V_chang(i+1)=sqrt(sum(mag_ajuste((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)↵
    *f_o/5).^2));
32          k(i+1)=sum((freq((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)*f_o/5)/f_o.*↵
    mag_ajuste((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)*f_o/5)).^2)/(sum(↵
    mag_ajuste((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)*f_o/5).^2));
33          F_chang(i+1)=sqrt(k(i+1))*f_o;
34      end
35  else
36      for i=1:NN
37          V_chang(i+1)=sqrt(sum(mag_ajuste((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)↵
    *f_o/5).^2));
38          k(i+1)=sum((freq((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)*f_o/5)/f_o.*↵
    mag_ajuste((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)*f_o/5)).^2)/(sum(↵
    mag_ajuste((i-0.5)*f_o/5+1:(i+0.5)*f_o/5).^2));
39          F_chang(i+1)=sqrt(k(i+1))*f_o;

```

```

40     end
41 end
42
43 if (NN+1)<=3 && a_har(4)==0
44     THD_chang=sqrt(sum((V_chang(1)/V_chang(2)).^2));
45 else
46     THD_chang=sqrt(sum((V_chang(1) V_chang(3:(NN+1))]/V_chang(2)).^2));
47
48 end
49
50 E_sinal_chang=sqrt(sum(V_chang(:).^2));
51
52 end

```

C.4 Código da simulação dos métodos para o sinal de tensão

```

1  clc, clear all, close all
2  a_har=[0 0 1 0 0.07 0 0.06 0 0.03 0 0.0245]; % amplitudes ↵
        harmonicas
3  f_har=[0 0 60 0 180 0 300 0 420 0 540]; % frequencias harmonicas
4  phi=[0 0 0 0 100 0 2 0 88,8 0 -168]*2*pi/360; %fase
5  n_har=length(f_har); % numero de harmonicas
6  [sinal,naj]= teste_sinal_c_ruido(a_har,f_har,phi);
7  [THDG,THDS,TIDG,TIDS,THD_sinal_orig,TID_sinal_orig,E_sinal,↵
        E_sinal_eq,E_sinal_eq2,E_sinal_eq3,E_sinal_eq4]=metodo_IEC(↵
        naj,sinal,a_har,f_har); % funcao do metodo IEC
8  [F_chang,V_chang,THD_chang,E_sinal_chang]=metodo_chang(naj,f_har↵
        ,a_har,sinal);

```

C.5 Código da simulação dos métodos para o sinal de corrente

```

1  clc, clear all, close all

```

```

2 f_har=[0 0 60 0 120 0 180 0 240 0 300 0 360 0 420]; % ←
    frequencias harmonicas
3 a_har=[0 0 1 0 0.7 0 0.5 0 0.3 0 0.1 0 0.1 0 0.05]; % amplitudes←
    harmonicas
4 phi=[0 0 0 0 170 0 45 0 95 0 100 0 0 0 -120]*2*pi/360; %fase
5 n_har=length(f_har); % numero de harmonicas
6 [sinal,naj]= teste_sinal_c_ruido(a_har,f_har,phi);
7 [THDG,THDS,TIDG,TIDS,THD_sinal_orig,TID_sinal_orig,E_sinal,←
    E_sinal_eq,E_sinal_eq2,E_sinal_eq3,E_sinal_eq4]=metodo_IEC(←
    naj,sinal,a_har,f_har); % funcao do metodo IEC
8 [F_chang,V_chang,THD_chang,E_sinal_chang]=metodo_chang(naj,f_har←
    ,a_har,sinal); % funcao do metodo chang

```

C.6 Código da simulação dos métodos para o sinal de tensão com inter-harmônicas

```

1 clc, clear all, close all
2 f=60; % frequencia
3 nac=256; % numero de amostras por ciclo
4 ncj=12; % numero de ciclos por janela
5 naj=nac*ncj;%numero de amostras por janela
6 delta_f=5; % resolucao
7 Fs = nac*f; % frequencia de amostragem
8 T = 1/Fs; % periodo de amostragem
9 t = (0:naj-1)*T; % vetor de tempo
10
11 f_har_inter=[0 0 60 91 120 152.2 180 213.5 240 274 300 305 360 ←
    411 420 0 540]; % frequencias harmonicas e inter-harmonicas
12 a_har_inter=[0 0 1 0.002 0 0.002 0.07 0.002 0 0.002 0.06 0.002 0←
    0.002 0.03 0 0.0245]; % amplitudes harmonicas e inter-←
    harmonicas
13 phi=[0 0 0 -35 0 12 100 -75 0 105 2 0 0 57 88,8 0 -168]*2*pi←
    /360;
14 n_har=length(f_har_inter); % numero de harmonicas
15
16 sinal=zeros(length(t),1);
17 for k=1:n_har

```

```

18 sinal=sinal + a_har_inter(k)*sin(2*pi*f_har_inter(k)*t+phi(k))';
19 end
20 sinal_ruído=awgn(sinal,35);
21
22 [THDG,THDS,TIDG,TIDS,THD_sinal_orig,TID_sinal_orig,E_sinal,↵
    E_sinal_eq,E_sinal_eq2,E_sinal_eq3,E_sinal_eq4]=metodo_IEC(↵
    naj,sinal_ruído,a_har_inter,f_har_inter); % funcao do metodo↵
    IEC
23 [F_chang,V_chang,THD_chang,E_sinal_chang]=metodo_chang(naj,↵
    f_har_inter,a_har_inter,sinal_ruído);

```

C.7 Código da simulação dos métodos para o sinal de corrente com inter-harmônicas

```

1 clc, clear all, close all
2 f=60; % frequencia
3 nac=256; % numero de amostras por ciclo
4 ncj=12; % numero de ciclos por janela
5 naj=nac*ncj;%numero de amostras por janela
6 delta_f=5; % resolucao
7 Fs = nac*f; % frequencia de amostragem
8 T = 1/Fs; % periodo de amostragem
9 t = (0:naj-1)*T; % vetor de tempo
10
11 f_har_inter=[0 0 60 91 120 152.2 180 213.5 240 274 300 305 360 ↵
    411 420]; % frequencias harmonicas e inter-harmonicas
12 a_har_inter=[0 0 1 0.2 0.7 0.2 0.5 0.2 0.3 0.2 0.1 0.2 0.1 0.2 ↵
    0.05]; % amplitudes harmonicas e inter-harmonicas
13 phi=[0 0 0 -40 170 5 45 -105 95 90 100 10 0 180 -120]*2*pi/360;
14 n_har=length(f_har_inter); % numero de harmonicas
15
16 sinal=zeros(length(t),1);
17 for k=1:n_har
18 sinal=sinal + a_har_inter(k)*sin(2*pi*f_har_inter(k)*t+phi(k))';
19 end
20 sinal_ruído=awgn(sinal,35);
21 energia_tempo=sqrt(sum(sinal_ruído(:).^2)/3072);

```

```

22 [THDG, THDS, TIDG, TIDS, THD_sinal_orig, TID_sinal_orig, E_sinal, ↵
    E_sinal_eq, E_sinal_eq2, E_sinal_eq3, E_sinal_eq4]=metodo_IEC(↵
    naj, sinal_ruido, a_har_inter, f_har_inter); % funcao do metodo↵
    IEC
23 [F_chang, V_chang, THD_chang, E_sinal_chang]=metodo_chang(naj, ↵
    f_har_inter, a_har_inter, sinal_ruido);

```

C.8 Código da simulação do teste de sensibilidade à amplitude e frequência

```

1 % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % ↵
  %
2 %                                                                 ↵
  %
3 % Testes de frequencia e amplitude dos metodos IEC e Chang      ↵
  %
4 % Autor: Fabricio de Matos Alves                                ↵
  %
5 % Engenharia de Energia- UnB                                     ↵
  %
6 % Faculdade do Gama - FGa                                       ↵
  %
7 % TCC                                                            ↵
  %
8 % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % ↵
  %
9 clc, clear all, close all
10
11 %sinal de tensao para teste
12 a_har=[0 0 1 0 0.08 0 0.06 ]; % amplitudes harmonicas
13 f_har=[0 0 60 0 180 0 300 ]; % frequencias harmonicas
14 phi=[0 0 0 0 0 0 0];
15 n_har=length(f_har); % numero de harmonicas
16 amp=0:0.01:1;
17 n=max(f_har)/60;
18 nn=0;
19 THDG=cell((max(f_har)/3),length(amp)); THDS=cell((max(f_har)/3),↵

```



```

    length(amp));
20
21 THD_sinal_orig=cell((max(f_har)/3),length(amp));THD_chang=cell((↵
    max(f_har)/3),length(amp));
22
23 TIDG=cell((max(f_har)/3),length(amp));TIDS=cell((max(f_har)/3),↵
    length(amp));
24 TID_sinal_orig=cell((max(f_har)/3),length(amp));TID_chang=cell((↵
    max(f_har)/3),length(amp));
25 E_sinal=cell((max(f_har)/3),length(amp));E_sinal_eq=cell((max(↵
    f_har)/3),length(amp));
26 E_sinal_eq2=cell((max(f_har)/3),length(amp)); E_sinal_eq3=cell((↵
    max(f_har)/3),length(amp));
27 E_sinal_eq4=cell((max(f_har)/3),length(amp));E_sinal_chang=cell↵
    ((max(f_har)/3),length(amp));
28 V_IEC2=cell((max(f_har)/3),length(amp)); F_IEC2=cell((max(f_har)↵
    /3),length(amp));
29
30
31 for kk=amp
32     nn=nn+1;
33     for k=1:1:(max(f_har)/3)
34
35         f=k*3; % frequencias de 3Hz em 3Hz
36
37         if f>0 && f<60
38
39             a_har=[0 0 1 0 0.08 0 0.06 ]; % amplitudes ↵
                harmonicas
40             f_har=[0 0 60 0 180 0 300 ]; % frequencias ↵
                harmonicas
41             phi=[0 0 0 0 0 0 0];
42             a_har(2)=kk;
43             f_har(2)=f;
44             [sinal,naj]=teste_sinal(a_har,f_har,phi); % sinal ↵
                construido
45             % METODO IEC
46
47             [THDG{k,nn},THDS{k,nn},TIDG{k,nn},TIDS{k,nn},↵
                THD_sinal_orig{k,nn},TID_sinal_orig{k,nn},E_sinal↵
                {k,nn},...
48             E_sinal_eq{k,nn},E_sinal_eq2{k,nn},E_sinal_eq3{k,nn}↵

```

```

    },E_sinal_eq4{k,nn},V_IEC2{k,nn},F_IEC2{k,nn}]=metodo_IEC(naj,sinal,a_har,f_har);
49
50     % METODO CHANG
51     [F_chang,V_chang,THD_chang{k,nn},E_sinal_chang{k,nn},...
    ...]=metodo_chang(naj,f_har,a_har,sinal);
52 end
53 for j=1:floor(n/2)
54     if f>60*(j*2-1) && f<60*((j+1)*2-1) && f~=60*(j*2)
55         a_har=[0 0 1 0 0.08 0 0.06]; % amplitudes ←
    ...harmonicas
56         f_har=[0 0 60 0 180 0 300]; % frequencias ←
    ...harmonicas
57         phi=[0 0 0 0 0 0 0];
58         a_har((j+1)*2)=kk;
59         f_har((j+1)*2)=f;
60         [sinal]=teste_sinal(a_har,f_har,phi); %sinal ←
    ...construido
61     % METODO IEC
62     [THDG{k,nn},THDS{k,nn},TIDG{k,nn},TIDS{k,nn},...
    ...THD_sinal_orig{k,nn},TID_sinal_orig{k,nn},...
63     E_sinal{k,nn},E_sinal_eq{k,nn},E_sinal_eq2{k,nn},...
    ...E_sinal_eq3{k,nn},...
64     E_sinal_eq4{k,nn}]=metodo_IEC(naj,sinal,a_har,f_har);
65     % METODO CHANG
66     [F_chang,V_chang,THD_chang{k,nn},E_sinal_chang{k,nn},...
    ...]=metodo_chang(naj,f_har,a_har,sinal);
67
68     end
69 end
70 for j=1:n
71     if f==60*j
72         a_har=[0 0 1 0 0.08 0 0.06]; % amplitudes ←
    ...harmonicas
73         f_har=[0 0 60 0 180 0 300]; % frequencias ←
    ...harmonicas
74         phi=[0 0 0 0 0 0 0];
75         [sinal]=teste_sinal(a_har,f_har,phi); %sinal ←
    ...construido
76         [THDG{k,nn},THDS{k,nn},TIDG{k,nn},TIDS{k,nn},...
    ...THD_sinal_orig{k,nn},TID_sinal_orig{k,nn},...

```

```

77         E_sinal{k,nn},E_sinal_eq{k,nn},E_sinal_eq2{k,nn}↵
           },E_sinal_eq3{k,nn},...
78         E_sinal_eq4{k,nn}]=metodo_IEC(naj,sinal,a_har,↵
           f_har);
79         % METODO CHANG
80         [F_chang,V_chang,THD_chang{k,nn},E_sinal_chang{k↵
           ,nn}]=metodo_chang(naj,f_har,a_har,sinal);
81     end
82 end
83 end
84
85 end
86 THDG=cell2mat(THDG);THDS=cell2mat(THDS);
87
88 THD_sinal_orig=cell2mat(THD_sinal_orig);THD_chang=cell2mat(↵
    THD_chang);
89
90 TIDG=cell2mat(TIDG);TIDS=cell2mat(TIDS);
91 TID_sinal_orig=cell2mat(TID_sinal_orig);
92 E_sinal=cell2mat(E_sinal);E_sinal_eq=cell2mat(E_sinal_eq);
93 E_sinal_eq2=cell2mat(E_sinal_eq2); E_sinal_eq3=cell2mat(↵
    E_sinal_eq3);
94 E_sinal_eq4=cell2mat(E_sinal_eq4);E_sinal_chang=cell2mat(↵
    E_sinal_chang);
95 V_IEC2=cell2mat(V_IEC2);F_IEC2=cell2mat(F_IEC2);

```

C.9 Código do 1º algoritmo proposto

```

1  % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % ↵
    %
2  %                                                                 ↵
    %
3  % Ajuste da frequencia do metodo IEC - 1                               ↵
    %
4  % Autor: Fabricio de Matos Alves                                       ↵
    %
5  % Engenharia de Energia- UnB                                           ↵
    %

```

[illegible]

```

41 N=freq(i)/f_o;
42 k=floor(N);
43 if N==k && k>=1
44     kk=kk+1;
45     mag_max(kk)=max(mag_ajuste(i+1:1:i+11));
46     for j=i+1:1:i+11
47         if mag_max(kk)==mag_ajuste(j)
48             cont=cont+1;
49             freq_iec_n(cont)=freq(j);
50         end
51     end
52
53 end
54 end
55 for i=1:length(F_IEC)/2
56     F_IEC(2*i)=freq_iec_n(i);
57 end
58
59 end

```

C.10 Código do 2º algoritmo proposto

```

1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%↩
    %
2 %                                                                 ↩
    %
3 % Ajuste da frequencia do metodo IEC -2                      ↩
    %
4 % Autor: Fabricio de Matos Alves                             ↩
    %
5 % Engenharia de Energia- UnB                                  ↩
    %
6 % Faculdade do Gama - FGa                                     ↩
    %
7 % TCC                                                         %
8 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%↩
    %
9 function [V_IEC_NOVO,F_IEC_NOVO]= ajuste_freq_iec_2(naj,sinal,↩

```

```

        a_har,f_har)
10 f_o=60; %frequencia fundamental
11 nac=256; % numero de amostras por ciclo
12 transf = fft(sinal); % transformada de fourier
13 mag= abs(transf/naj); % modulo da transformada
14 mag_ajuste = mag(1:(naj/2+1))'; % (N/2+1) coeficientes
15 mag_ajuste(1:end-1) = 2*mag_ajuste(1:end-1); % ajuste da ↵
        potencia para um lado do espectro
16 mag_ajuste=mag_ajuste/sqrt(2); % valor em RMS
17 Fs = nac*f_o; % frequencia de amostragem
18 freq = Fs*(0:(naj/2))/naj; % vetor de frequencias
19 [THDG,THDS,TIDG,TIDS,THD_sinal_orig,TID_sinal_orig,E_sinal,↵
        E_sinal_eq,E_sinal_eq2,E_sinal_eq3,E_sinal_eq4,V_IEC,F_IEC]=↵
        metodo_IEC(naj,sinal,a_har,f_har)
20
21 for i=1:length(V_IEC)/2
22     V_IEC_p(i)=V_IEC(2*i);
23 end
24 V_IEC_n=[];
25 kk=0;
26 mag_max=[];
27 cont=0;
28 cont_1=0;
29 freq_iec_n=[];
30 ind=[];
31 for i=1:(max(f_har)/5+1)
32     if freq(i)==0
33         kk=kk+1;
34         mag_max(1)=max(mag_ajuste(i+1:1:i+11));
35         for j=i+1:1:i+11
36             if mag_ajuste(j)== mag_max(1)
37                 cont=cont+1;
38                 ind(cont)=j;
39                 freq_iec_n(cont)=freq(j);
40             end
41         end
42
43         if cont>1 %amplitudes iguais e maximas
44             V_IEC_n(kk)= V_IEC_p(kk)*mag_ajuste(ind(2))/(sum↵
                 (mag_ajuste(ind(1:cont))));
45             V_IEC_n(kk+1)= V_IEC_p(kk)*(mag_ajuste(ind(1))/(↵
                 sum(mag_ajuste(ind(1:cont)))));

```

```

46         else % detecta a segunda maior amplitude
47
48             mag_ajuste(ind(cont))=0;
49             kk=kk+1;
50             mag_max(kk)=max(mag_ajuste(i+1:1:i+11));
51             for j=i+1:1:i+11
52                 if mag_ajuste(j)== mag_max(kk)
53                     cont=cont+1;
54                     ind(cont)=j;
55                     freq_iec_n(cont)=freq(j);
56                 end
57             end
58             freq_iec_n=sort(freq_iec_n);
59             mag_ajuste(ind(cont)-1)=mag_max(1);
60             V_IEC_n(kk-1)=V_IEC_p(kk-1)*mag_ajuste(ind(2))/(←
                    sum(mag_ajuste(ind(1:cont)))));
61             V_IEC_n(kk)= V_IEC_p(kk-1)*(mag_ajuste(ind(1))/(←
                    sum(mag_ajuste(ind(1:cont))))));
62         end
63
64     end
65
66     N=freq(i)/f_o;
67     k=floor(N);
68     if N==k && k>=1
69         kk=kk+1;
70         mag_max(kk)=max(mag_ajuste(i+1:1:i+11));
71         for j=i+1:1:i+11
72             if mag_max(kk)==mag_ajuste(j)
73                 cont_1=cont_1+1;
74                 cont=cont+1;
75                 ind(cont_1)=j;
76                 freq_iec_n(cont)=freq(j);
77                 %V_IEC_n(kk)=mag_ajuste(j);
78             end
79         end
80         if cont_1>1 %amplitudes iguais e maximas
81             V_IEC_n(kk)= V_IEC_p(kk-1)*mag_ajuste(ind(2))/(←
                    sum(mag_ajuste(ind(1:cont)))));
82             V_IEC_n(kk+1)= V_IEC_p(kk-1)*(mag_ajuste(ind(1))←
                    /(sum(mag_ajuste(ind(1:cont)))));
83         else % detecta a segunda maior amplitude

```

```

84
85         mag_ajuste(ind(cont_1))=0;
86         kk=kk+1;
87         mag_max(kk)=max(mag_ajuste(i+1:1:i+11));
88         for j=i+1:1:i+11
89             if mag_ajuste(j)== mag_max(kk)
90                 cont_1=cont_1+1;
91                 cont=cont+1;
92                 ind(cont_1)=j;
93                 freq_iec_n(cont)=freq(j);
94             end
95         end
96
97         freq_iec_n=sort(freq_iec_n);
98         mag_ajuste(ind(cont_1-1))=mag_max(kk-1);
99
100        V_IEC_n(kk-1)=V_IEC_p(kk/2-1)*mag_ajuste(ind(1))↔
            /(sum(mag_ajuste(ind(1:cont_1))));
101        V_IEC_n(kk)= V_IEC_p(kk/2-1)*(mag_ajuste(ind(2))↔
            /(sum(mag_ajuste(ind(1:cont_1))));
102
103        end
104        cont_1=0;
105    end
106 end
107
108 F_IEC_NOVO=zeros(1,length(F_IEC)+kk-length(V_IEC_p));
109
110 F_IEC_NOVO(1)=F_IEC(1);
111 for jj=2:length(F_IEC)/2
112     F_IEC_NOVO(1+(jj-1)*3)=F_IEC(2*jj-1);
113 end
114 F_IEC_NOVO(2)=freq_iec_n(1);
115 F_IEC_NOVO(3)=freq_iec_n(2);
116 for jj=2:length(freq_iec_n)/2
117     F_IEC_NOVO(2+(jj-1)*3)=freq_iec_n(jj*2-1);
118     F_IEC_NOVO(3+(jj-1)*3)=freq_iec_n(2*jj);
119 end
120
121 V_IEC_NOVO=zeros(1,length(V_IEC)+kk-length(V_IEC_p));
122
123 V_IEC_NOVO(1)=V_IEC(1);

```

```
124 for jj=2:length(V_IEC)/2
125     V_IEC_NOVO(1+(jj-1)*3)=V_IEC(2*jj-1);
126 end
127 V_IEC_NOVO(2)=V_IEC_n(1);
128 V_IEC_NOVO(3)=V_IEC_n(2);
129 for jj=2:length(freq_iec_n)/2
130     V_IEC_NOVO(2+(jj-1)*3)=V_IEC_n(jj*2-1);
131     V_IEC_NOVO(3+(jj-1)*3)=V_IEC_n(2*jj);
132 end
133
134 end
```
